

# **ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

## **Μεταπτυχιακή Εργασία**

**«Μοντελοποίηση για το Σχεδιασμό Δικτύου Κοινόχρηστων  
Ποδηλάτων με Εκτιμώμενη Ωριαία Ζήτηση»**

**Φραγκογιός Αντώνιος**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Σαχαρίδης Γεώργιος**

**ΒΟΛΟΣ 2014**



© 2014 Αντώνιος Φραγκογιός

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).



## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Γεώργιος Σαχαρίδης  
Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Λυμπερόπουλος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Κοζανίδης  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας



## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Λέκτορα κ. Γεώργιο Σαχαρίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου, καθώς και για την παρότρυνση και τις συμβουλές του. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον κ. Γεώργιο Μαυρωτά, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. από τον Τομέα Ανάλυσης, Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Διεργασιών και Συστημάτων και το Εργαστήριο Βιομηχανικής & Ενεργειακής Οικονομίας της ίδιας Σχολής, για την πολύτιμη βοήθειά του κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συμφοιτήτρια και φίλη μου Ελεόυσα Ζυγούρη με την οποία μελετήσαμε μαζί το δίκτυο κοινόχρηστων ποδηλάτων και εργαστήκαμε από κοινού για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Ευχαριστώ όλους τους φίλους και συγγενείς μου για την ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια υλοποίησης της παρούσας εργασίας. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα του γονείς μου που στάθηκαν δίπλα μου με αγάπη καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών και με υποστηρίζουν με ακόμη περισσότερη αγάπη σε κάθε στόχο μου. Αφιερώνω αυτήν την μεταπτυχιακή εργασία στην μητέρα μου και στον πατέρα μου.

Αντώνης Φραγκογιός





# ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ ΜΕ ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗ ΩΡΙΑΙΑ ΖΗΤΗΣΗ

ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΦΡΑΓΚΟΓΙΟΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2014

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γεώργιος Σαχαρίδης, Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Περίληψη

Τα Δίκτυα Κοινόχρηστων Ποδηλάτων (Bike Sharing Networks) εγκαθίστανται σε όλο και περισσότερες πόλεις παγκοσμίως τα τελευταία δέκα χρόνια. Εξαιτίας της αύξησης της παγκόσμιας μηχανοκίνησης και της κλιματικής αλλαγής, αποτελούν μια επιλογή μηδενικών ρύπων με σκοπό να βελτιώσουν τη σύνδεση με άλλα Μέσα Μεταφοράς, ιδιαίτερα στην κάλυψη του πρώτου ή τελευταίου μιλίου, διευκολύνοντας έτσι τις μετακινήσεις σε μια πυκνοκατοικημένη πόλη. Η ιδέα πίσω από την ανάπτυξη τέτοιων δικτύων είναι ότι μια σειρά από ποδήλατα είναι διαθέσιμα για χρήση από μία μεγάλη ομάδα ανθρώπων, χωρίς να χρειάζεται κάποιος να αγοράσει ένα ποδήλατο για τη μετακίνησή του.

Αντικείμενο της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η μοντελοποίηση ενός τέτοιου δικτύου με σκοπό να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός του. Το μαθηματικό μοντέλο, το οποίο αναπτύχθηκε είναι ένα μοντέλο Αμιγώς Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Pure Integer Linear Program) και αφορά το σχεδιασμό ενός τέτοιου δικτύου πριν την εγκατάστασή του σε μια πόλη. Συγκεκριμένα, με δεδομένο το διαθέσιμο προϋπολογισμό για τη δημιουργία του δικτύου και με μια εκτιμώμενη ωριαία ζήτηση σε επιλεγμένες τοποθεσίες της πόλης, το μοντέλο αποφασίζει τον αριθμό και την τοποθεσία των σταθμών ενοικίασης ποδηλάτων, το μέγεθος του καθενός, καθώς και το πόσα ποδήλατα πρέπει να έχει καθένας στην αρχή της ημέρας προκειμένου να εξυπηρετηθεί η εκτιμώμενη ζήτηση.



## Πίνακας Περιεχομένων

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ .....</b>	<b>19</b>
1.1	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	19
1.1.1	Δίκτυα Κοινόχρηστων Ποδηλάτων στην Ευρώπη.....	19
1.1.1.1	Πρώτη Γενιά Δικτύων Κοινόχρηστων Ποδηλάτων .....	19
1.1.1.2	Δεύτερη Γενιά Δικτύων Κοινόχρηστων Ποδηλάτων.....	20
1.1.1.3	Τρίτη Γενιά Δικτύων Κοινόχρηστων Ποδηλάτων.....	21
1.1.2	Δίκτυα Κοινόχρηστων Ποδηλάτων στην Αμερική.....	22
1.2	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΟΙΝΟΧΡΗΣΤΩΝ ΠΟΔΗΛΑΤΩΝ.....	24
1.2.1	Velib' (Παρίσι - Γαλλία).....	24
1.2.2	Barclays Cycle Hire (Λονδίνο) .....	25
1.2.3	Citi Bike (Νέα Υόρκη) .....	27
1.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ .....	29
1.4	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	30
1.4.1	<i>Bicycle-Sharing System Deployment, Utilization and the Value of Re-distribution</i> .....	30
1.4.2	<i>A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and Solution</i> .....	31
1.4.3	<i>A multi-periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization</i> .....	32
1.4.4	<i>An optimisation algorithm to establish the location of stations of a mixed fleet biking system an application to the city of Lisbon</i> .....	32
1.4.5	<i>Optimizing the location of stations in bike-sharing programs A GIS approach</i> .....	33
1.4.6	<i>Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications</i> .....	33
1.5	ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	34
<b>2</b>	<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....</b>	<b>35</b>
2.1	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ.....	35
2.2	ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ .....	37
2.2.1	Γενικά .....	37
2.2.2	Μορφοποίηση Προβλημάτων .....	38
2.2.3	Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός.....	40
2.2.4	Μοντελοποίηση.....	41
2.3	ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	42
<b>3</b>	<b>ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....</b>	<b>43</b>
3.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ .....	43
3.2	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	44
3.2.1	Δείκτες και Σύνολα .....	44
3.2.2	Δεδομένα.....	45
3.2.3	Μεταβλητές Απόφασης.....	46
3.2.4	Επεξήγηση της θεώρησης του μοντέλου.....	47
3.2.5	Αντικειμενική Συνάρτηση .....	48
3.2.6	Περιορισμοί.....	50
3.2.6.1	Μαθηματική ανάλυση των περιορισμών .....	54
3.3	ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	57
<b>4</b>	<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΑΘΗΝΑ ΚΑΙ ΒΟΛΟ .....</b>	<b>59</b>
4.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΩΔΙΚΑ .....	59
4.2	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΖΗΤΗΣΗΣ .....	63

4.3	ΑΘΗΝΑ .....	64
4.4	ΒΟΛΟΣ .....	71
4.5	ΕΠΙΛΟΓΟΣ .....	75
<b>5</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ.....</b>	<b>77</b>
5.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΚΠ ΑΘΗΝΑΣ.....	77
5.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΚΠ ΒΟΛΟΥ .....	81
5.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΘΗΝΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ MONTE CARLO.....	85
5.3.1	<i>Σύγκριση αποτελεσμάτων για <math>perde=1</math> .....</i>	<i>86</i>
5.3.2	<i>Σύγκριση αποτελεσμάτων για <math>perde=0.5</math> .....</i>	<i>88</i>
5.4	ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ .....	89
<b>6</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>91</b>

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4-1: Κόστη εγκατάστασης ενός ΔΚΠ.....	69
Πίνακας 5-1 Αποτελέσματα της 1ης και 2ης περίπτωσης για το ΔΚΠ της Αθήνας.....	78
Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα της 1 <sup>ης</sup> και 2 <sup>ης</sup> περίπτωσης για το ΔΚΠ Βόλου.....	82
Πίνακας 5-3: Συγκριτικά συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την περίπτωση $perde=1$ .....	86
Πίνακας 5-4: Συγκριτικά συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την περίπτωση $perde=0.5$ .....	88



## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3-1: Σχηματική αναπαράσταση του ΔΚΠ, όπως αυτό θεωρείται από το μαθηματικό μοντέλο.....	48
Σχήμα 4-1: Διάγραμμα Ροής για τους κώδικες όλης της διαδικασίας (πράσινο: Visual Basic, μπλε: C++).....	63
Σχήμα 4-2: α) Η ωριαία "Ζήτηση για Παραλαβή" κάθε cluster κατά τη διάρκεια μίας ημέρας στην Αθήνα .....	68
Σχήμα 4-3: α) Η ωριαία "Ζήτηση για Παραλαβή" κάθε cluster κατά τη διάρκεια μίας ημέρας στο Βόλο .....	73





## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1: Τα "White Bikes" στο Άμστερνταμ .....	19
Εικόνα 1-2: Ποδήλατα του δικτύου Bicykel στο Άρχους .....	21
Εικόνα 1-3: Σταθμός ποδηλάτων του δικτύου Bicing στην Βαρκελώνη .....	22
Εικόνα 1-4: Σταθμός ποδηλάτων του δικτύου SmartBike στην Ουάσιγκτον .....	23
Εικόνα 1-5: Χάρτης σταθμών ποδηλάτων "Velib" .....	25
Εικόνα 1-6: Χάρτης σταθμών ποδηλάτων "Barclays Cycle Hire" .....	27
Εικόνα 1-7: Χάρτης σταθμών ποδηλάτων "Citi Bike" .....	28
Εικόνα 4-1: Αρχείο Excel για τα δεδομένα «Ζήτησης για Παραλαβή» για το κέντρο της Αθήνας. Κάτω δεξιά διακρίνεται το κουμπί ελέγχου με το οποίο εκτελείται ο κώδικας σε Visual Basic. ....	60
Εικόνα 4-2: Το περιβάλλον ανάπτυξης του κώδικα Visual Basic και η Ρουτίνα για την εξαγωγή των δεδομένων της «Ζήτησης για Παραλαβή» σε αρχείο .txt.....	61
Εικόνα 4-3: Αρχείο .txt με τα δεδομένα της «Ζήτησης για Παραλαβή» σε μορφή κατάλληλη για εισαγωγή στον κώδικα C++ .....	61
Εικόνα 4-4: Αρχείο Excel με τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου. Δεξιά διακρίνεται το κουμπί ελέγχου για την ανάγνωση των αρχείων .txt που προκύπτουν από τον κώδικα C++. ....	62
Εικόνα 4-5: Χάρτης της Αθήνας, στον οποίο εμφανίζονται τα 7 δημοτικά διαμερίσματα.....	65
Εικόνα 4-6: Οι υποψήφιοι σταθμοί ανάλογα με το cluster στο οποίο ανήκουν και το συντελεστή που τους προσδιορίζει. ....	69
Εικόνα 4-7: Χάρτης του Δήμου Βόλου, στον οποίο εμφανίζονται τα 9 δημοτικά διαμερίσματα .....	71
Εικόνα 4-8: Οι υποψήφιες τοποθεσίες σταθμών ανάλογα με το cluster στο οποίο ανήκουν και το συντελεστή που τους προσδιορίζει. ....	74
Εικόνα 5-1: Οι εγκατεστημένοι σταθμοί του ΔΚΠ της Αθήνας για την 1η περίπτωση (perde=1) .....	79
Εικόνα 5-2: Οι εγκατεστημένοι σταθμοί του ΔΚΠ της Αθήνας για την 2η περίπτωση (perde=0.5) .....	80
Εικόνα 5-4: Οι εγκατεστημένοι σταθμοί του ΔΚΠ του Βόλου για την 2 <sup>η</sup> περίπτωση (perde=0.5) .....	83
Εικόνα 5-3: Οι εγκατεστημένοι σταθμοί του ΔΚΠ του Βόλου για την 1 <sup>η</sup> περίπτωση (perde=1) .....	83
Εικόνα 5-5: Χάρτης λύσης με τη προσομοίωση Monte Carlo για perde=1 .....	87
Εικόνα 5-6: Χάρτης λύσης με τη προσομοίωση Monte Carlo για perde=0.5 .....	88



## 1 Εισαγωγή στα Δίκτυα Κοινόχρηστων Ποδηλάτων

Τα Δίκτυα Κοινόχρηστων Ποδηλάτων (ΔΚΠ) κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος στην Αστική Βιώσιμη Κινητικότητα τα τελευταία χρόνια, καθώς αποτελούν μια επιλογή μηδενικών ρύπων που βελτιώνει τη μετακίνηση σε μια πόλη. Ένα τέτοιο δίκτυο αποτελείται από σταθμούς ενοικίασης ποδηλάτων, ποδήλατα και ένα πληροφοριακό σύστημα επικοινωνίας με το χρήστη για την ταυτοποίησή του. Υπάρχουν τρεις γενιές Δικτύων Κοινόχρηστων Ποδηλάτων.

### 1.1 Ιστορική Αναδρομή

#### 1.1.1 Δίκτυα Κοινόχρηστων Ποδηλάτων στην Ευρώπη

##### 1.1.1.1 Πρώτη Γενιά Δικτύων Κοινόχρηστων Ποδηλάτων

Η 1<sup>η</sup> γενιά έκανε την εμφάνισή της το 1965, όταν τα “White Bikes” σκορπίστηκαν στο Άμστερνταμ για δημόσια χρήση (1). Σ’ αυτή τη γενιά των ΔΚΠ το ποδήλατο αποτελούσε το βασικό στοιχείο. Άλλα χαρακτηριστικά της πρώτης γενιάς ήταν το έντονο φωτεινό χρώμα των ποδηλάτων, η έλλειψη κάποιου τύπου κλειδώματος, καθώς επίσης και η τυχαία τοποθέτηση των ποδηλάτων σε κάθε περιοχή για τη δωρεάν χρήση τους.



Εικόνα 1-1: Τα "White Bikes" στο Άμστερνταμ

Άλλες πόλεις οι οποίες εφάρμοσαν παρόμοια ελεύθερα δίκτυα ποδηλάτων ήταν η γαλλική πόλη La Rochelle το 1974 και η Cambridge του Ηνωμένου Βασιλείου το 1993 με το δίκτυο της τελευταίας να ονομάζεται “Green Bike Schemes”, έχοντας στο στόλο του 300 κοινόχρηστα ποδήλατα. Ανάμεσα σ’ αυτά τα τρία δίκτυα, επιτυχημένο αποδείχθηκε μόνο του δίκτυο της πόλης La Rochelle με την ονομασία “Vélos Jaunes”, το οποίο ξεκίνησε ως ένα προοδευτικό περιβαλλοντικό μέτρο και με την υποστήριξη της αστικής κοινότητας της La Rochelle συνεχίζει τη λειτουργία του έως σήμερα. Αντίθετα τα άλλα δύο δίκτυα δεν ήταν επιτυχημένα, καθώς μέσα σε λίγες ημέρες τα ποδήλατα είχαν κλαπεί ή καταστραφεί.

#### ***1.1.1.2 Δεύτερη Γενιά Δικτύων Κοινόχρηστων Ποδηλάτων***

Η 2<sup>η</sup> γενιά ξεκίνησε ως συνέπεια των προβλημάτων της 1<sup>ης</sup> γενιάς ΔΚΠ. Το City Bike Foundation της Κοπεγχάγης στη Δανία ξεκίνησε ένα ΔΚΠ, το οποίο ήταν διαφορετικό από κάθε προηγούμενο σύστημα. Τον Ιανουάριο του 1995, το “Bycyklen” ξεκίνησε ως το πρώτο μεγάλης κλίμακας πρόγραμμα αστικών ΔΚΠ στην Ευρώπη. Η πρωτοβουλία αυτή περιελάμβανε 1.100 ειδικά σχεδιασμένα ποδήλατα, τα οποία ήταν κλειδωμένα και τοποθετημένα σε όλο το κέντρο της πόλης της Κοπεγχάγης σε καθορισμένα σημεία. Τα ποδήλατα ξεκλειδώνονταν από τους χρήστες με ένα κέρμα, το οποίο επιστρεφόταν στο χρήστη με την επιστροφή του ποδηλάτου. Η Κοπεγχάγη με αυτό το ΔΚΠ οδήγησε λοιπόν στα “Coin-Deposit Systems”, τα οποία είχαν ως χαρακτηριστικά τα ειδικά σχεδιασμένα ποδήλατα, τους σταθμούς ποδηλάτων στους οποίους τα ποδήλατα ήταν κλειδωμένα και κάποιος μπορούσε να τα δανειστεί και στη συνέχεια να τα επιστρέψει καθώς επίσης και στη χρήση μικρού αντιτίμου για το ξεκλείδωμα του ποδηλάτου.

Λίγο μετά την εφαρμογή του ΔΚΠ στην Κοπεγχάγη, μία σειρά από ευρωπαϊκά προγράμματα ξεκίνησε την εγκατάσταση ΔΚΠ, όπως το “Bicycle” στο Sandnes της Νορβηγίας το 1996, το “City Bikes” στο Ελσίνκι της Φινλανδίας το 2000 και το “Bycykel” στο Όρχους της Δανίας το 2005. Η εμπειρία αυτών των δικτύων έδειξε πως τα ΔΚΠ 2<sup>ης</sup> γενιάς ήταν πιο ακριβά από αυτά της 1<sup>ης</sup> γενιάς. Συχνά μη κερδοσκοπικές οργανώσεις δημιουργούσαν ΔΚΠ, τα οποία σε πολλές περιπτώσεις χρηματοδοτούνταν από την εκάστοτε κυβέρνηση.

Η ενσωμάτωση των καθορισμένων σταθμών ποδηλάτων και η χρήση του κλειδώματος σε αυτά τα ΔΚΠ δημιούργησε πολύ πιο αξιόπιστα ΔΚΠ από αυτά της 1<sup>ης</sup> γενιάς. Ωστόσο και στις δύο γενιές ΔΚΠ η κλοπή των ποδηλάτων παρέμενε το σημαντικότερο πρόβλημα και σε συνδυασμό με τη μη επαρκή υποστήριξη τα ΔΚΠ οδηγήθηκαν στην 3<sup>η</sup> τους γενιά.



**Εικόνα 1-2: Ποδήλατα του δικτύου Bysykel στο Άρχους**

### ***1.1.1.3 Τρίτη Γενιά Δικτύων Κοινόχρηστων Ποδηλάτων***

Τα προβλήματα της 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> γενιάς ΔΚΠ κατέδειξαν λοιπόν την ανάγκη για εξέλιξη των ΔΚΠ, έτσι ώστε να είναι βιώσιμα. Έτσι, η 3<sup>η</sup> γενιά ΔΚΠ καινοτόμησε ενσωματώνοντας προηγμένες τεχνολογίες για την κράτηση των ποδηλάτων, καθώς πληροφορίες εντοπισμού κατά τη διάρκεια των διαδρομών. Τα κύρια στοιχεία αυτής της γενιάς των ΔΚΠ είναι ο ειδικός σχεδιασμός των ποδηλάτων, οι θέσεις στάθμευσης, τα καθορισμένα σημεία επικοινωνίας του χρήστη με το σύστημα για το check in - check out από το σταθμό, καθώς επίσης και η χρήση εξελιγμένης τεχνολογίας όπως για παράδειγμα μαγνητικές κάρτες για το ξεκλείδωμα των ποδηλάτων.

Η πρώτη εφαρμογή της 3<sup>ης</sup> γενιάς είναι το σύστημα “Bikeabout” το 1996 στο Πανεπιστήμιο του Πόρτσμουθ, όπου οι μαθητές μπορούσαν να νοικιάσουν ένα ποδήλατο, χρησιμοποιώντας μια μαγνητική κάρτα. Παρά την επιτυχία του, δεν ήταν πριν το 2005 όταν αυτή η γενιά άνθισε με την έναρξη του “Velo’v” με 1500 ποδήλατα στη Λυών. Δύο χρόνια αργότερα, στο Παρίσι δημιουργήθηκε το “Velib” και στη Βαρκελώνη το “Bicing”, που είναι δύο από τα πιο επιτυχημένα σύγχρονα δίκτυα. Σήμερα, υπάρχουν πάνω από 712 δίκτυα σε λειτουργία σε ισάριθμες πόλεις



και περισσότερα από 229 υπό σχεδιασμό ή υπό κατασκευή παγκοσμίως, σύμφωνα με τη Metrobike (2).



Εικόνα 1-3: Σταθμός ποδηλάτων του δικτύου Bicing στην Βαρκελώνη

### 1.1.2 Δίκτυα Κοινόχρηστων Ποδηλάτων στην Αμερική

Η ιστορία των ΔΚΠ στην Αμερική είναι μικρότερη απ' ότι στην Ευρώπη έχοντας ωστόσο μεταβεί μέσα από τρεις γενιές ΔΚΠ (3). Το 1994, η United Community Action Network, μια μικρή μη κερδοσκοπική οργάνωση, ξεκίνησε το πρώτο ΔΚΠ στο Πόρτλαντ του Όρεγκον με την ονομασία "Yellow Bike". Εξήντα ποδήλατα αφέθηκαν ξεκλειδωτά στην πλατεία Pioneer στο Πόρτλαντ, τα οποία ήταν διαθέσιμα να τα χρησιμοποιεί οποιοσδήποτε. Ωστόσο, αυτό το πρόγραμμα έκλεισε το 2001. Λίγο αργότερα, το "Yellow Bike" εξελίχθηκε σε "Create A Commuter" επικεντρώνοντας στην παροχή καλύτερων ποδηλατικών υπηρεσιών. Από το 2007, η πόλη του Πόρτλαντ προσπάθησε να δημιουργήσει ένα νέο εξελιγμένο ΔΚΠ.

Το 1995, λίγο μετά την εισαγωγή του "Yellow Bike", η πόλη Μπάουλντερ στο Κολοράντο ξεκίνησε το "Green Bike Program". Στο συγκεκριμένο ΔΚΠ διατέθηκαν 130 ποδήλατα για ελεύθερη χρήση, τα οποία τα συντηρούσε εθελοντικά μία ομάδα μαθητών. Τελικά, κι αυτό το ΔΚΠ σταμάτησε τη λειτουργία του εξαιτίας της κλοπής των ποδηλάτων.

Το 1996, οι δίδυμες πόλεις Μινεάπολη και Αγ. Παύλος ξεκίνησαν το “Yellow Bike Project”, στο οποίο τοποθέτησαν 150 ποδήλατα σε συγκεκριμένα σημεία των πόλεων. Οι χρήστες μπορούσαν να ξεκλειδώσουν τα ποδήλατα με το αντίτιμο των 10\$. Επίσης, η Μινεάπολη επέλεξε ως κατασκευαστή του ΔΚΠ “BIXI” του Μόντρεαλ την εταιρία Public Bike System (PBSC) για την παροχή 1000 ποδηλάτων και την κατασκευή 80 σταθμών.



**Εικόνα 1-4: Σταθμός ποδηλάτων του δικτύου SmartBike στην Ουάσιγκτον**

Στην πορεία των ΔΚΠ στην Αμερική, το 2008 ξεκίνησε στην Ουάσιγκτον το “SmartBike”, το οποίο σηματοδότησε την αρχή της εμπειρίας των ΔΚΠ με τη χρήση πιο εξελιγμένης τεχνολογίας με τη χρηματοδότηση μίας ιδιωτικής διαφημιστικής εταιρείας, της Clear Channel. Το 2010 η Περιφέρεια της Κολούμπια εγκαινίασε ένα νέο ΔΚΠ με την ονομασία “Capital Bikeshare”, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Μεταφορών και ήταν μέχρι το 2013 το μεγαλύτερο ΔΚΠ στην Αμερική με στόλο 200 ποδηλάτων και ετήσια επιβατική κίνηση 2 εκατομμυρίων. Το 2013 ξεκίνησε στην Νέα Υόρκη τη λειτουργία του το μεγαλύτερο ΔΚΠ στις Ηνωμένες Πολιτείες με την ονομασία “Citi Bike” με στόλο 6000 ποδήλατα και 330 σταθμούς.

## 1.2 Παρουσίαση Σύγχρονων Δικτύων Κοινόχρηστων Ποδηλάτων

### 1.2.1 Velib' (Παρίσι - Γαλλία)

Όπως προαναφέρθηκε, ένα από τα πιο επιτυχημένα ΔΚΠ παγκοσμίως είναι αυτό της πόλης του Παρισιού. Το όνομα του (“Vélib’”) προέρχεται από τη σύντμηση των λέξεων “vélo libre”, που σημαίνει «δωρεάν ποδήλατο». Είναι ένα δημόσιο πρόγραμμα ενοικίασης ποδηλάτων, που ξεκίνησε στις 15 Ιουλίου του 2007, μετά από την επιτυχία του “Vélo’n” της Λυών και το πρωτοποριακό σύστημα της πόλης “La Rochelle” το 1974. Δέκα χιλιάδες ποδήλατα εισήχθησαν στην πόλη με 750 αυτοματοποιημένους σταθμούς ενοικίασης που ο καθένας είχε δεκαπέντε ή περισσότερες θέσεις στάθμευσης. Οι αριθμοί αυτοί έχουν αυξηθεί από τότε σε 20.000 ποδήλατα και 1.800 σταθμούς, καταλήγοντας σε περίπου ένα σταθμό ανά 300 μέτρα σε όλη την πόλη. Κάθε σταθμός “Vélib’” είναι εξοπλισμένος με αυτόματο τερματικό ενοικίασης και περιέχει χάρτη που δείχνει όλους τους σταθμούς. Τα ανθεκτικά γκρι ποδήλατα παρήχθησαν από τη γαλλική εταιρεία ποδηλάτων Mercier στην Ουγγαρία και επισκευάζονται από JCDecaux. Πρόκειται για ποδήλατα τριών ταχυτήτων, που το καθένα ζυγίζει 22,5 κιλά, έχουν φως LED, που τροφοδοτείται από ένα μπροστινό δυναμό, ένα σύστημα ασφάλισης και ένα καλάθι μπροστά.

Εάν ένας χρήστης πάει με ένα νοικιασμένο ποδήλατο σε έναν σταθμό χωρίς ελεύθερες θέσεις, ο σταθμός χορηγεί άλλα δεκαπέντε λεπτά ελεύθερο χρόνο ενοικίασης. Οι τερματικοί σταθμοί ενοικίασης εμφανίζουν πληροφορίες σχετικά με τους γειτονικούς σταθμούς “Vélib’”, περιλαμβάνοντας την τοποθεσία, τον αριθμό των διαθέσιμων ποδηλάτων και τις ελεύθερες θέσεις στάθμευσης. Ένας στόλος από είκοσι οχήματα μεταφοράς ποδηλάτων χρησιμοποιούνται τη νύχτα για την αναδιανομή των ποδηλάτων στους σταθμούς υψηλής ζήτησης για το επόμενο πρωί.

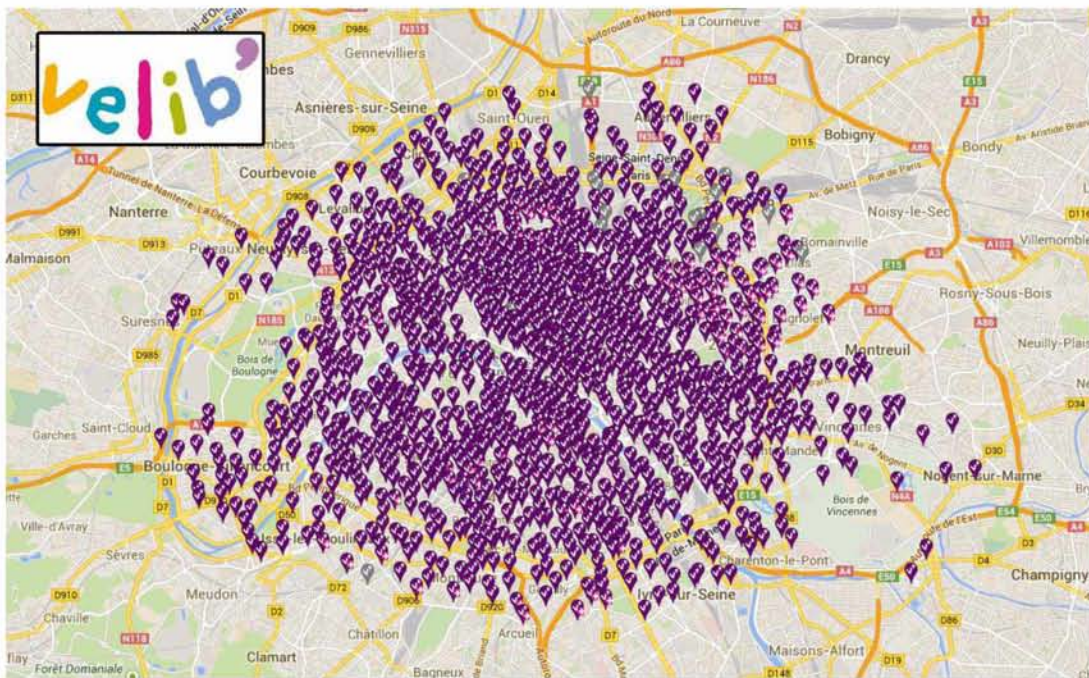
Για να χρησιμοποιήσουν το σύστημα, οι χρήστες πρέπει να αγοράσουν μια συνδρομή, η οποία επιτρέπει στο συνδρομητή απεριόριστο αριθμό ενοικιάσεων. Οι εγγραφές μπορούν να αγοραστούν με 1€/ημέρα, 5€/βδομάδα ή 29€/χρόνο. Με τη συνδρομή ενοικίασης ποδηλάτων πρώτη μισή ώρα του κάθε ταξιδιού είναι δωρεάν. Απεριόριστος αριθμός τέτοιων δωρεάν ταξιδιών μπορούν να γίνουν σε μια ημέρα. Ένα ταξίδι που διαρκεί περισσότερο από 30 λεπτά χρεώνεται με € 1 έως € 4 για κάθε επιπλέον 30 λεπτά. Η κλίμακα αυξανόμενης τιμής έχει ως στόχο να κρατήσει τα ποδήλατα σε κυκλοφορία. Μια πιστωτική ή χρεωστική κάρτα απαιτείται για την εγγραφή στο πρόγραμμα και την ενοικίαση ποδηλάτων. Η πιστωτική/χρεωστική κάρτα χρεώνεται με € 150, αν ένα νοικιασμένο ποδήλατο δεν επιστραφεί.

Το σύστημα χρηματοδοτείται από τη διαφημιστική εταιρεία JCDecaux, ενώ μέρος των εσόδων από τις διαφημιστικές πινακίδες αποδίδεται στην πόλη του Παρισιού. Η JCDecaux κατέβαλλε τα αρχικά έξοδα των περίπου 115 εκατομμυρίων δολαρίων και απασχολεί προσωπικό περίπου 285 ατόμων με πλήρες ωράριο για τη λειτουργία του συστήματος και την επισκευή των ποδηλάτων για 10 χρόνια. Η πόλη



του Παρισιού λαμβάνει όλα τα έσοδα από το πρόγραμμα, καθώς και ένα ποσό περίπου 4,3 εκατ. δολάρια το χρόνο. Σε αντάλλαγμα η JCDecaux έχει τον αποκλειστικό έλεγχο των 1.628 διαφημιστικών πινακίδων που βρίσκονται στην πόλη. Η πόλη έχει περίπου το ήμισυ του εν λόγω διαφημιστικού χώρου χωρίς χρέωση για διαφημίσεις δημοσίου συμφέροντος.

Λόγω ενός απροσδόκητα υψηλού ποσοστού βανδαλισμού σε σύγκριση με το σύστημα της Λυών, η πόλη του Παρισιού συμφώνησε να πληρώσει \$500 ανά ποδηλάτο που χρειάζεται αντικατάσταση, το οποίο κοστίζει μέχρι και 2 εκατομμύρια δολάρια ετησίως.



Εικόνα 1-5: Χάρτης σταθμών ποδηλάτων "Velib"

### 1.2.2 Barclays Cycle Hire (Λονδίνο)

Το “Barclays Cycle Hire” είναι το δημόσιο ΔΚΠ, το οποίο είναι εγκατεστημένο στην πόλη του Λονδίνου (4). Το δίκτυο είναι γνωστό και με την ονομασία Boris Bikes, όνομα που προέρχεται από τον Boris Johnson, ο οποίος ήταν δήμαρχος στο Λονδίνο όταν ξεκίνησε το συγκεκριμένο ΔΚΠ. Το σύστημα άρχισε τη λειτουργία του στις 30 Ιουλίου 2010 από την “Transport for London” και έχοντας ως διαχειριστή τον όμιλο “Serco”.

Τον Αύγουστο του 2007 ο δήμαρχος του Λονδίνου, Κεν Λίβινγκστον, ανακοίνωσε ότι σχεδιάζει να εφαρμόσει ένα σύστημα ενοικίασης ποδηλάτων στα πρότυπα του επιτυχημένου ΔΚΠ “Vélib” του Παρισιού. Μετά από συζητήσεις με τον δήμαρχο του Παρισιού, η εταιρία Livingstone έδωσε οδηγίες για τη μελέτη του

“Vélib’”, έτσι ώστε να εκπονήσει προτάσεις για το Λονδίνο. Οι συζητήσεις διεξήχθησαν μεταξύ της TfL, τις συνοικίες του Λονδίνου και τις υπηρεσίες μεταφορών από τη Λυών, τις Βρυξέλλες, τη Βιέννη, το Βερολίνο, το Μόναχο, το Όσλο και την Κοπεγχάγη.

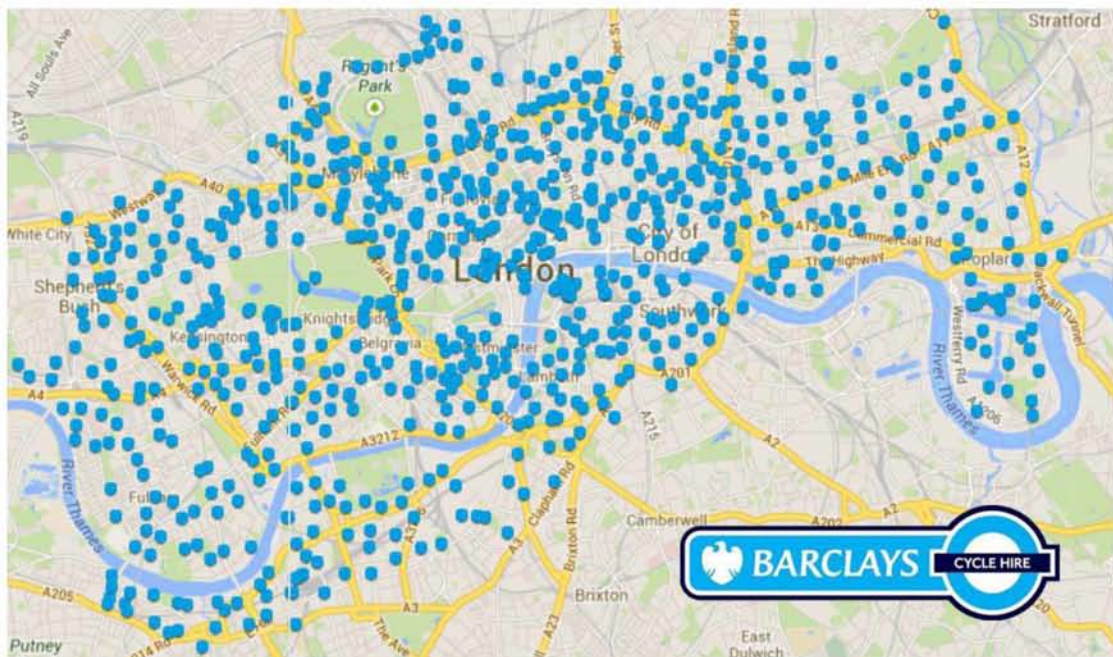
Το ΔΚΠ άρχισε να λειτουργεί τον Ιούλιο του 2010 με 5.000 ποδήλατα και 315 σταθμούς ενοικίασης, οι οποίοι εγκαταστάθηκαν σε όλη την πόλη του Λονδίνου και στις 8 συνοικίες του Λονδίνου. Η ζώνη κάλυψης εκτείνεται σε περίπου 17 τετραγωνικά μίλια. Το Μάρτιο του 2012 ο αριθμός των ποδηλάτων έφτασε τα 8.000 σε 570 σταθμούς ενοικίασης. Μέχρι τότε είχαν πραγματοποιηθεί πάνω από 19 εκατομμύρια διαδρομές.

Αρχικά, το ΔΚΠ όρισε την αρχική πληρωμή της εγγραφής και της συνδρομής των μελών, έτσι ώστε το κάθε μέλος να έχει στη διάθεσή του τον ηλεκτρονικό κωδικό για την πρόσβασή του με διάρκεια μίας ημέρας, μίας εβδομάδας ή ενός χρόνου. Ωστόσο στις 3 Δεκεμβρίου 2010 αυτό άλλαξε, επιτρέποντας τόσο στο τακτικό κοινό όσο και στο περιστασιακό να χρησιμοποιεί το ΔΚΠ με τη χρήση μιας έγκυρης πιστωτικής ή χρεωστικής κάρτας. Το σύστημα επιτρέπει στο χρήστη να κινηθεί δωρεάν για τα πρώτα 30 λεπτά και στη συνέχεια επιβαρύνεται αναλόγως του επιπλέον χρόνου που έχει στην κατοχή του το ποδήλατο.

Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά των ποδηλάτων είναι: η ανθεκτική κατασκευή των ελαστικών, τα προστατευμένα φρένα σε καθέναν από τους δύο τροχούς, οι τρεις ταχύτητες στη δεξιά λαβή του τιμονιού, το κουδούνι στην αριστερή λαβή, η μικρή σχάρα μπροστά από το τιμόνι η οποία λειτουργεί ως αποθηκευτικός χώρος, τα φώτα LED τα οποία καθιστούν ορατό το ποδήλατο στην κυκλοφορία, καθώς επίσης και οι αντιπροσωπευτικοί αριθμοί για κάθε ποδήλατο οι οποίοι είναι τοποθετημένοι και στις δύο πλευρές του πλαισίου του ποδηλάτου και οι οποίοι το προσδιορίζουν μονοσήμαντα.

Συνοπτικά, ο χρήστης νοικιάζει ένα ποδήλατο με τη χρήση μίας έγκυρης κάρτας και στη συνέχεια εκτυπώνει ένα αρχείο της διαδρομής. Αποδεσμεύει το ποδήλατο από το σταθμό ενοικίασης και πραγματοποιεί τη διαδρομή του. Κατά την επιστροφή του ποδηλάτου, σε περίπτωση που ο επιθυμητός σταθμός είναι γεμάτος μπορεί να επιλέξει κάποιον από τους κοντινούς σε αυτόν, παίρνοντας δωρεάν επιπλέον χρόνο. Αν υπάρχει βλάβη στο ποδήλατο ο χρήστης μπορεί να πατήσει το «κόκκινο» κουμπί, έτσι ώστε να ενημερωθεί το ΔΚΠ για τη βλάβη. Τέλος, σε ώρες αιχμής εάν κάποιοι σταθμοί είναι γεμάτοι υπάρχει δυνατότητα με τη χρήση φορητών να μετακινηθούν ποδήλατα σε άδειους σταθμούς.





Εικόνα 1-6: Χάρτης σταθμών ποδηλάτων "Barclays Cycle Hire"

### 1.2.3 Citi Bike (Νέα Υόρκη)

Το “Citi Bike” είναι ένα ιδιόκτητο ΔΚΠ, το οποίο είναι εγκατεστημένο στην πόλη της Νέας Υόρκης και είναι το μεγαλύτερο ΔΚΠ στις Ηνωμένες Πολιτείες (5). Το σύστημα άνοιξε για το κοινό το Μάιο του 2013 με 330 σταθμούς και με 6.000 ποδήλατα, αλλά μέσα σε έξι εβδομάδες, ο πραγματικός αριθμός σε χρήση εμφανίστηκε να είναι μικρότερος από 4300.

Η εταιρεία “Alta Bicycle Share” επιλέχθηκε το Σεπτέμβριο του 2011 για την ανάπτυξη και τη λειτουργία του συστήματος με τη χρήση της τεχνολογίας του ΔΚΠ “Bixi” του Montreal. Το ΔΚΠ λειτουργεί χωρίς την επιχορήγηση της πόλης και πήρε το όνομά του από τη “Citigroup”, η οποία ξόδεψε 41 εκατομμύρια δολάρια για να είναι χορηγός για έξι χρόνια. Από τις 28 Φεβρουαρίου 2014 ο συνολικός αριθμός των ετήσιων συνδρομητών είναι 97.864.

Σε μια προσπάθεια να μειωθούν οι εκπομπές ρύπων λόγω της μετακίνησης, η κυκλοφοριακή συμφόρηση και η βελτίωση της δημόσιας υγείας, το New York City Department of Transportation (NYCDOT) άρχισε να ερευνά εναλλακτικές μορφές μεταφοράς. Η επιτροπή του Υπουργείου διαπίστωσε ότι το 10% των μετακινήσεων με αυτοκίνητο είναι κάτω από το ένα μίλι, το 22% είναι κάτω από το ένα μίλι και το 56% είναι κάτω από τρία μίλια, δηλαδή αποστάσεις οι οποίες εξυπηρετούνται εύκολα με ποδήλατο. Η πόλη, η οποία είχε ήδη θετική προδιάθεση για την ποδηλασία ως εναλλακτική λύση μεταφοράς, αποφάσισε να εγκαταστήσει ένα ΔΚΠ, όπως τα δίκτυα που είχαν προηγηθεί σε άλλες πόλεις.



Το 2009 το NYC Department of City Planning (DCP) συνέστησε την εγκατάσταση στους τέσσερις πιο πολυπληθείς δήμους της πόλης. Ο σχεδιασμός του ΔΚΠ θα έπρεπε να είχε ξεκινήσει το φθινόπωρο του 2011, αλλά εξαιτίας κάποιων προβλημάτων στο λογισμικό ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2012. Καθώς προχωρούσε ο σχεδιασμός, κάποιοι κάτοικοι εξέφρασαν την απογοήτευσή τους για την έλλειψη σταθμών ενοικίασης στις γειτονιές τους, ενώ κάποιοι άλλοι διαμαρτυρήθηκαν για το αντίθετο. Το “Citi Bike” άρχισε τελικά τις εργασίες στις 27 Μαΐου του 2013, με 330 σταθμούς στο Μανχάταν και στο Μπρούκλιν. Στη συνέχεια το ΔΚΠ επεκτάθηκε σε 10.000 ποδήλατα και σε 600 σταθμούς στο Μανχάταν, καθώς σε διάφορες γειτονιές του Μπρούκλιν, συμπεριλαμβανομένων των Greenpoint, Crown Heights, Bedford-Stuyvesant, Park Slope και Carroll Garden. Ωστόσο μερικά τοπικά καταστήματα ποδηλάτων στις τουριστικές περιοχές ανέφεραν μείωση τους ενοικίασης ποδηλάτων, και κάποιοι παραπονέθηκαν ότι το “Citi Bike” ήταν παραπλανητικό για τουρίστες. Μερικοί υποτίμησαν το χρώμα των ποδηλάτων και τους σταθμούς για ύπαρξη κινδύνου πυρκαγιάς.

Συνοπτικά ο χρήστης μπορεί να αγοράσει την πρόσβαση για μία ημέρα ή μία εβδομάδα με τη χρήση πιστωτικής κάρτας, στην οποία δεσμεύονται 101\$ για την εγγύηση του ποδηλάτου. Ο χρήστης μπορεί να ξεκλειδώσει το ποδήλατο από το σταθμό ενοικίασης και να πραγματοποιήσει τη διαδρομή του. Τα 30 πρώτα λεπτά της χρήσης είναι δωρεάν και στη συνέχεια επιβαρύνεται αναλόγως του επιπλέον χρόνου που έχει στην κατοχή του το ποδήλατο. Κατά την επιστροφή του ποδηλάτου, σε περίπτωση που ο επιθυμητός σταθμός είναι γεμάτος μπορεί να επιλέξει κάποιον από τους κοντινούς σε αυτόν, παίρνοντας δωρεάν 15 λεπτά επιπλέον χρόνο.



**Εικόνα 1-7: Χάρτης σταθμών ποδηλάτων "Citi Bike"**

### 1.3 Περιγραφή του προβλήματος

Προκειμένου ένα τέτοιο δίκτυο να είναι επιτυχές κατά τη χρήση του καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει ο σχεδιασμός του. Με τον όρο «σχεδιασμός» εννοούμε την πριν την εγκατάστασή του απόφαση για το πόσους σταθμούς θα έχει και πού, πόσο μεγάλος θα είναι ο κάθε σταθμός, δηλαδή πόσες θέσεις στάθμευσης ποδηλάτων πρέπει να έχει, καθώς και πόσα ποδήλατα θα έχει το δίκτυο και ποια θα είναι η κατανομή αυτών στους σταθμούς. Επιτυχές κρίνεται ένα δίκτυο όταν τελικά μετά τη δημιουργία του χρησιμοποιείται πολύ από τους κατοίκους της πόλης, δηλαδή εξυπηρετεί όσο το δυνατό περισσότερη ζήτηση. Συγκεκριμένα, οι σταθμοί πρέπει να βρίσκονται σε εκείνες τις τοποθεσίες που θα εξυπηρετούν περισσότερους πολίτες. Επίσης, ο χρήστης του δικτύου είναι απαραίτητο να βρίσκει πάντα ποδήλατο να πάρει από το σταθμό που επιθυμεί, όπως, επίσης, πρέπει να βρίσκει και κενή θέση για να αφήσει και να κλειδώσει το ποδήλατο στο σταθμό που επιθυμεί. Όπως καταλαβαίνει κανείς εύκολα, το πού θα κατασκευασθούν οι σταθμοί, καθώς και το πόσες θέσεις στάθμευσης και πόσα ποδήλατα θα έχει ο καθένας είναι αποφάσεις που λαμβάνονται κατά το σχεδιασμό του δικτύου, αλλά επηρεάζουν καθοριστικά τη μετέπειτα λειτουργία του.

Έναν βασικό περιορισμό στον παραπάνω σχεδιασμό συνιστά ο διαθέσιμος προϋπολογισμός για την εγκατάσταση ενός τέτοιου δικτύου. Κάθε σταθμός έχει ένα κόστος για να δημιουργηθεί, το οποίο εξαρτάται και από το μέγεθός του. Γενικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο σταθμός τόσο μεγαλύτερο το κόστος κατασκευής του. Παράλληλα, όμως, κάθε ποδήλατο έχει ένα κόστος αγοράς. Για το λόγο αυτό δεν είναι δυνατό να κατασκευαστούν παντού σταθμοί, όπως δεν είναι δυνατό να έχουμε άπειρα ποδήλατα στο δίκτυο.

Επιπλέον, κριτήριο για το σχεδιασμό ενός Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων αποτελεί η εκτιμώμενη ζήτηση, την οποία θα κληθεί μετέπειτα να καλύψει. Με τον όρο «ζήτηση» εννοείται ο αριθμός των χρηστών του συστήματος που επιθυμούν να παραλάβουν ένα ποδήλατο από ένα σταθμό, καθώς και ο αριθμός εκείνων που επιθυμούν να αφήσουν ένα ποδήλατο σε ένα σταθμό. Η γεωγραφική συνιστώσα της εν λόγω ζήτησης είναι αυτή που θα καθορίσει το πού θα κατασκευαστούν σταθμοί σε συνδυασμό με το μέγεθός της, που θα καθορίσει το πόσο μεγάλος θα είναι ο κάθε σταθμός. Μία άλλη, όμως, συνιστώσα της ζήτησης, όχι τόσο ορατή, είναι ο χρόνος, δηλαδή σε ποια ώρα της ημέρας εμφανίζεται. Είναι εμφανές ότι το δίκτυο που βρίσκεται υπό σχεδιασμό θα «δοκιμαστεί» στις λεγόμενες ώρες αιχμής, δηλαδή όταν θα υπάρχει μεγάλη κίνηση ποδηλάτων και πολλοί πολίτες θα επιθυμούν να παραλάβουν ή να αποθέσουν ποδήλατα στους διάφορους σταθμούς του δικτύου. Συνεπώς, η χρονική εξέλιξη της ζήτησης στη διάρκεια μιας ημέρας είναι αυτή που θα καθορίσει το σχεδιασμό του δικτύου, καθώς αντικειμενικός σκοπός είναι η ικανοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερης ζήτησης.

Όπως, λοιπόν, γίνεται αντιληπτό, το πρόβλημα σχεδιασμού ενός Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων είναι ένα σύνθετο πρόβλημα Αμιγώς Ακέραιου

Προγραμματισμού. Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προτείνει μια νέα μαθηματική μορφοποίηση για το σχεδιασμό των δικτύων αυτών που ενσωματώνει μια εκτιμώμενη ωριαία ζήτηση, τα κόστη της εγκατάστασης, την εγγύτητα και την πυκνότητα των σταθμών, καθώς και το μέγεθός τους. Έχοντας ένα προεπιλεγμένο σύνολο υποψήφιων τοποθεσιών των σταθμών και με ένα προκαθορισμένο διαθέσιμο προϋπολογισμό, το μοντέλο αποφασίζει τον αριθμό και την τοποθεσία των σταθμών, πόσο μεγάλοι θα είναι και πόσα ποδήλατα θα πρέπει να έχουν στην αρχή της ημέρας, προκειμένου να ικανοποιηθεί η προβλεπόμενη ζήτηση.

## **1.4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση**

Λόγω της μικρής ηλικίας των Δικτύων Κοινόχρηστων Ποδηλάτων η βιβλιογραφία σχετικά με το σχεδιασμό τους δεν είναι πολύ πλούσια. Ορισμένες δημοσιεύσεις που πραγματεύονται το εν λόγω πρόβλημα και που λήφθηκαν υπόψη κατά την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας παρατίθενται σε αυτή την παράγραφο. Μπορεί να συμπεραίνει κανείς εύκολα, πως η βιβλιογραφία στερείται μιας εργασίας που να πραγματεύεται αποκλειστικά το σχεδιασμό ενός τέτοιου δικτύου στο σύνολό του για την τοποθεσία των σταθμών, το μέγεθος και τα ποδήλατα του καθενός χρησιμοποιώντας αμιγώς συμβατικά ποδήλατα και χρονικά μεταβαλλόμενη ντετερμινιστική ζήτηση με μειωμένη πολυπλοκότητα στην προσομοίωση του δικτύου. Το κενό αυτό στη βιβλιογραφία φιλοδοξεί να καλύψει η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

### **1.4.1 Bicycle-Sharing System Deployment, Utilization and the Value of Re-distribution**

Οι Shu et al. (2010) (6) πρότειναν πρακτικά μοντέλα για το σχεδιασμό και τη διαχείριση ενός Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων με δεδομένη την τοποθεσία των σταθμών. Ένα στοχαστικό μοντέλο ροής δικτύου χρησιμοποιείται προκειμένου να προβλεφτεί η ροή των ποδηλάτων στο δίκτυο και να εκτιμηθεί ο αριθμός των ταξιδιών που υποστηρίζονται από το σύστημα, ο κατάλληλος αριθμός των ποδηλάτων που χρειάζεται να αναπτυχθεί και ο αριθμός των θέσεων στάθμευσης που απαιτούνται σε κάθε σταθμό εξετάζοντας παράλληλα την περιοδική ανακατανομή των ποδηλάτων. Χρησιμοποιείται ένα ντετερμινιστικό μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού, για την προσέγγιση της απόδοσης του στοχαστικού συστήματος, και διαπιστώνεται ότι το ντετερμινιστικό μοντέλο μπορεί να μιμηθεί την πραγματική απόδοση του συστήματος πολύ στενά σε σχέση με την πραγματική επιβατική κίνηση του MRT στη Σιγκαπούρη. Πραγματοποιήθηκαν πολλά αριθμητικά πειράματα, έτσι ώστε να μελετηθούν εκτενέστερα σημαντικά θέματα, όπως το ποσοστό χρησιμοποίησης του ποδηλάτου, η αξία της εκ νέου διάθεσης των ποδηλάτων και ο αριθμός των ποδηλάτων που θα πρέπει να έχει ο κάθε σταθμός. Παρά το γεγονός ότι

το μοντέλο χρησιμοποιείται για την ανάλυση σχετικά με τη χρήση των ποδηλάτων, έτσι ώστε να αντικατασταθούν βραχυπρόθεσμα οι μετακινήσεις με MRT, δεν είναι δύσκολο να δει κανείς ότι το μοντέλο είναι αρκετά γενικό ώστε να υλοποιηθεί το σενάριο της χρήσης ποδηλάτων στις μεταφορές μεταξύ των σταθμών MRT και των διάφορων περιοχών στην πόλη, καθώς επίσης και οι επιβάτες μπορεί να μην είναι σε θέση να φτάσουν στο σταθμό προορισμού τους, χρησιμοποιώντας ποδήλατα σε χρονικό διάστημα εντός 15 λεπτών.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ο αριθμός και η θέση των σταθμών δεν είναι προκαθορισμένα, όπως στο (6), αλλά μέρος του προβλήματος του σχεδιασμού. Επιπλέον, η ζήτηση σε κάθε υποψήφια θέση είναι ντετερμινιστική και χρονικά εξαρτώμενη στη διάρκεια της ημέρας. Τέλος, η παρούσα εργασία ασχολείται με το σχεδιασμό των εν λόγω δικτύων και όχι τη διαχείρισή τους, έτσι δεν λαμβάνονται υπόψη πτυχές αναδιανομής των ποδηλάτων, όπως στο (6).

#### **1.4.2 A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and Solution**

Οι Lin et al. (2011) (7) ανέπτυξαν ένα Αμιγώς Ακέραιο Μη-Γραμμικό Πρόγραμμα για το στρατηγικό σχεδιασμό ενός Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων. Έχοντας ως δεδομένο ένα σύνολο σημείων προέλευσης και προορισμού, υποψήφιων σταθμών ποδηλάτων και τη ζήτηση μετακίνησης από τα σημεία προέλευσης προς τους προορισμούς, βελτιστοποιεί τη χωροθέτηση των σταθμών και των ποδηλατοδρόμων και τον απαιτούμενο αριθμό κοινόχρηστων ποδηλάτων σε κάθε σταθμό προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία. Το πρώτο είναι η επαναληπτική χρήση ενός ευρετικού αλγορίθμου και το δεύτερο η εύρεση του κόστους της αντικειμενικής συνάρτησης με δοσμένο τον αριθμό των ποδηλάτων και των ποδηλατοδρόμων. Δημιουργήθηκε ένα επεξηγηματικό δίκτυο με σκοπό να εξηγήσει το προτεινόμενο μοντέλο καθώς και τη λύση αυτού. Έτσι λοιπόν, η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε έδειξε πόσο σημαντικές είναι οι παράμετροι που επηρεάζουν τις αποφάσεις για το απόθεμα, το σχεδιασμό του δικτύου και τις επιλογές δρομολόγησης.

Το παρόν μοντέλο είναι ένα Αμιγώς Ακέραιο Γραμμικό Πρόγραμμα όπου δεν υπάρχουν ροές από σημεία προέλευσης σε σημεία προορισμού, αλλά κάθε υποψήφια τοποθεσία χαρακτηρίζεται από ωριαία ζήτηση για παραλαβή και απόθεση ποδηλάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ότι παρέχει βελτιωμένη και λιγότερο περίπλοκη προσομοίωση της μελλοντικής χρήσης του δικτύου. Επιπλέον, το δίκτυο εξετάζεται ανεξάρτητα και, συνεπώς, η δημιουργία ποδηλατοδρόμων δεν εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής της παρούσας εργασίας.

#### **1.4.3 A multi-periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization**

Οι Sayarshad et al. (2011) (8) προτείνουν μια μαθηματική διαμόρφωση πολλών περιόδων που καθορίζει το ελάχιστο απαιτούμενο μέγεθος του στόλου ποδηλάτων που ελαχιστοποιεί ταυτόχρονα την ανικανοποίητη ζήτηση, τα μη χρησιμοποιούμενα ποδήλατα και την ανάγκη μεταφοράς ποδηλάτων μεταξύ των σταθμών ενοικίασης. Το μοντέλο αφορά το σχεδιασμό ενός δικτύου για μετακινήσεις μικρών αποστάσεων σε μικρές κοινότητες ή για μετακινήσεις με τη χρήση πολλαπλών μέσων, έτσι ώστε να φτάσει ο καθένας στον τελικό του προορισμό. Η μορφοποίηση αυτή χρησιμοποιεί πληροφορίες από το ποδηλατικό δίκτυο, όπως η χωρητικότητα των σταθμών ποδηλάτων, η ανικανοποίητη ζήτηση και ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων ποδηλάτων σε κάθε δεδομένη στιγμή και θέση. Το μοντέλο ελαχιστοποιεί την ανικανοποίητη ζήτηση και το κόστος λειτουργίας του δικτύου για το σύνολο των ποδηλάτων, έτσι ώστε να μη χρειάζεται να μεταφέρονται τα ποδήλατα ανάμεσα στους σταθμούς για την ικανοποίηση της ζήτησης. Κατά συνέπεια το μοντέλο παρέχει ένα εργαλείο στους διαχειριστές των συστημάτων ενοικίασης ποδηλάτων για το βελτιστοποιημένο σχεδιασμό αυτών.

Η παρούσα εργασία, όπως και το (8), χρησιμοποιεί διαμόρφωση πολλών περιόδων όπως αυτά καθορίζονται με βάση την καθημερινότητα των χρηστών του ΔΚΠ. Η αναδιανομή των ποδηλάτων δεν μελετάται, διότι η εργασία αντιμετωπίζει μόνο το πρόβλημα του σχεδιασμού του δικτύου και όχι την εγκατάσταση και την μετέπειτα χρήση του, όπως στο (8).

#### **1.4.4 An optimisation algorithm to establish the location of stations of a mixed fleet biking system an application to the city of Lisbon**

Οι Martinez et al. (2012) (9) ανέπτυξαν έναν ευρετικό αλγόριθμο, περιλαμβάνοντας ένα Μικτό Ακέραιο Γραμμικό Πρόγραμμα, το οποίο βελτιστοποιεί την τοποθεσία των σταθμών ποδηλάτων και το μέγεθος του στόλου, μετρώντας ταυτόχρονα την απαιτούμενη αναδιανομή ποδηλάτων. Το πρόγραμμα θεωρεί ένα μεικτό στόλο συμβατικών και ηλεκτρικών ποδηλάτων και διάφορες μεθόδους τιμολόγησης του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τη ζήτηση των χρηστών, τις απαιτούμενες επενδύσεις για ένα τέτοιο σύστημα, καθώς και τα διάφορα κόστη τα οποία προκύπτουν από τη λειτουργία ενός τέτοιου ΔΚΠ. Η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε μελετώντας τις εξεταζόμενες παραμέτρους έδειξε ότι το μαθηματικό μοντέλο είναι αποτελεσματικό με μεγάλες δυνατότητες για περαιτέρω ανάπτυξη τόσο σε περιπτώσεις μεσαίου όσο και μεγάλου όγκου δεδομένων.

Η παρούσα έρευνα εξετάζει μόνο συμβατικά ποδήλατα, καθώς θεωρείται πως η χρήση ηλεκτρικών απέχει αρκετά ακόμη από το να εφαρμοστεί σε ένα τέτοιο δίκτυο. Επιπλέον, δεν περιλαμβάνεται τιμολογιακή πολιτική, καθώς αυτό αποτελεί



έναν παράγοντα, ο οποίος μπορεί να αποφασιστεί μετά από την εγκατάσταση του δικτύου ενοικίασης ποδηλάτων στα πλαίσια μιας ολοκληρωμένης μελέτης για την εγκατάσταση ενός ΔΚΠ, κάτι το οποίο και δεν αποτελεί σκοπό αυτής της εργασίας.

#### **1.4.5 Optimizing the location of stations in bike-sharing programs A GIS approach**

Οι García-Palomares et al. (2012) (10) χρησιμοποιούν το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS-Geographic Information Systems) για τον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής της προβλεπόμενης ζήτησης για μετακινήσεις, της τοποθεσίας των σταθμών χρησιμοποιώντας μοντέλα κατανομής, της χωρητικότητας του κάθε σταθμού και των χαρακτηριστικών της ζήτησης στους σταθμούς. Οι λύσεις που μελετήθηκαν προέρχονται από δύο μοντέλα με διαφορετική αντικειμενική συνάρτηση το καθένα. Στο πρώτο μοντέλο σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της αντίστασης, όπου κάθε σταθμός βελτιστοποιείται προσπαθώντας να μικρύνει η διαφορά μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης, δίνοντας μια κατανομή των σταθμών, η οποία καλύπτει ομοιόμορφα ολόκληρη την περιοχή. Στο δεύτερο μοντέλο σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της κάλυψης, στο οποίο βελτιστοποιείται η συνολική κάλυψη του πληθυσμού σε μία συγκεκριμένη ακτίνα, με αποτέλεσμα τη συμπύκνωση των σταθμών ποδηλάτων σε ζώνες με μεγαλύτερη εκτιμώμενη ζήτηση.

Στην παρούσα μελέτη δεν χρησιμοποιείται το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, επειδή δεν κρίθηκε απαραίτητο, αφού τα δεδομένα της ζήτησης προέρχονται από καταγεγραμμένα δεδομένα χρήσης σε ήδη υπάρχοντα Δίκτυα Κοινόχρηστων Ποδηλάτων. Επίσης, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο το οποίο έχει ως αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση της ανικανοποίητης ζήτησης των χρηστών του ΔΚΠ.

#### **1.4.6 Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications**

Οι Farahani et al. (2013) (11) ασχολούνται με τα προβλήματα τοποθέτησης κεντρικών σημείων, κάνοντας μία ανασκόπηση των μαθηματικών μοντέλων, των μεθόδων λύσης και των κυριότερων χαρακτηριστικών αυτών από το 2007. Αυτού του είδους τα προβλήματα περιλαμβάνουν τη μετακίνηση των ανθρώπων και την κυκλοφορία τόσο εμπορευμάτων όσο και πληροφοριών μεταξύ προέλευσης και προορισμού. Οι τοποθετούμενοι κόμβοι εφαρμόζονται με σκοπό τη βελτιστοποίηση των μεταφορικών συνδέσεων, με σκοπό τις περισσότερες φορές την ελαχιστοποίηση του κόστους και των άσκοπων μετακινήσεων.

Στην παρούσα εργασία, η εγκατάσταση ενός ΔΚΠ αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα κόμβων κάλυψης, το οποίο σημαίνει ότι ένας εγκατεστημένος σταθμός-κόμβος καλύπτει τη ζήτηση των τοποθεσιών που βρίσκονται σε μία μέγιστη απόσταση από αυτό. Ωστόσο το αναπτυχθέν μοντέλο θεωρεί την ύπαρξη μεμονωμένων σημείων ζήτησης και όχι ζευγών προέλευσης-προορισμού όπως στο (11), αφού αυτό θα έκανε το πρόβλημα εξαιρετικά πολύπλοκο χωρίς να υπάρχει απαίτηση γι' αυτό. Τέλος, στην εργασία εισάγεται και η δυνατότητα της μη κάλυψης ολόκληρης της ζήτησης, αλλά ενός μέρους αυτής, με αποτέλεσμα ορισμένοι από τους πιθανούς πελάτες να χάνονται. Με αυτό τον τρόπο θεωρείται ότι προσομοιώνεται καλύτερα η συμπεριφορά των χρηστών ενός ΔΚΠ.

## 1.5 Επίλογος

Στο Κεφάλαιο αυτό έγινε μια ιστορική αναδρομή στην πορεία που ακολούθησαν τα Δίκτυα Κοινόχρηστων Ποδηλάτων μέχρι σήμερα στην Ευρώπη, απ' όπου ξεκίνησαν, και στην Αμερική. Ακολουθώντας, παρουσιάστηκαν αναλυτικότερα τρία από τα σημαντικότερα Δίκτυα Κοινόχρηστων Ποδηλάτων στον κόσμο, αυτά του Παρισιού, του Λονδίνου και της Νέας Υόρκης. Στη συνέχεια, έγινε διεξοδική περιγραφή του προβλήματος που πραγματεύεται η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, δηλαδή του προβλήματος του σχεδιασμού ενός τέτοιου δικτύου. Τέλος, έγινε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις εργασίες που πραγματεύονται το πρόβλημα σχεδιασμού ενός Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων.

## 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι βασικές έννοιες, οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση του προβλήματος από τη σκοπιά της μαθηματικής μοντελοποίησης.

### 2.1 Βελτιστοποίηση – Μαθηματικός Προγραμματισμός

Μαθηματικός προγραμματισμός είναι το σύνολο των μεθόδων και υπολογιστικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την επίλυση μιας κατηγορίας προβλημάτων βελτιστοποίησης (12). Τα προβλήματα αυτά περιγράφονται με τη βοήθεια ενός μαθηματικού προτύπου που αποτελείται από μία πραγματική συνάρτηση της οποίας ζητείται το μέγιστο ή το ελάχιστο, και από μία ομάδα συνθηκών που οι μεταβλητές της συνάρτησης πρέπει να ικανοποιούν. Έτσι, μπορούμε να ορίσουμε τον μαθηματικό προγραμματισμό ως ένα κλάδο των εφαρμοσμένων μαθηματικών που έχει ως αντικείμενο τη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση πραγματικών συναρτήσεων, κάτω από ορισμένους περιορισμούς για τις μεταβλητές.

Η λέξη *προγραμματισμός* δίνει ίσως την εντύπωση ότι πρόκειται για έναν κλάδο της επιστήμης των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αυτό δεν είναι σωστό, αν και η χρησιμοποίηση ηλεκτρονικών υπολογιστών διευκολύνει κατά πολύ την επίλυση σύνθετων προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού. Ο όρος προγραμματισμός εδώ, δηλώνει ότι οι ελεγχόμενες μεταβλητές του προτύπου πρόκειται να προγραμματισθούν ή επιλεγούν, έτσι ώστε η συνάρτηση του προτύπου να βελτιστοποιείται κάτω από δοσμένους περιορισμούς.

Συνεπώς, στα μοντέλα αυτά ορίζουμε *μεταβλητές απόφασης* (decision variables) που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες αποφάσεις - δραστηριότητες του εκάστοτε εξεταζόμενου προβλήματος. Μέσω των μεταβλητών αυτών είμαστε σε θέση να εκφράσουμε τους πραγματικούς λογικούς περιορισμούς του προβλήματος μετατρέποντάς τους σε αντίστοιχους *μαθηματικούς περιορισμούς* (constraints). Παράλληλα, διαμορφώνουμε και την *αντικειμενική συνάρτηση* (objective function) που εκφράζει το μέγεθος απόδοσης (performance measure), το οποίο θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε (π.χ. κόστος, κέρδος, κτλ.). Το σύνολο των περιορισμών του προβλήματος ορίζει ένα σύνολο λύσεων (region), το οποίο ονομάζεται εφικτό (feasible). Με αυτό τον τρόπο, προκύπτει ένα σύστημα ανισοτήτων / εξισώσεων με αγνώστους τις μεταβλητές απόφασης. Ονομάζουμε λύση του προβλήματος το συνδυασμό δύο βασικών συστατικών: τιμές για όλες τις μεταβλητές απόφασης και αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Μία λύση ονομάζεται εφικτή όταν ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του προβλήματος και μη εφικτή όταν παραβιάζει έστω και έναν από αυτούς. Το σύνολο όλων των εφικτών λύσεων του προβλήματος μπορεί να είναι κενό ή να έχει μία (μοναδική) ή περισσότερες (ακόμα και άπειρες)

λύσεις. Σε περίπτωση που το σύνολο αυτό είναι κενό, η διαδικασία βελτιστοποίησης τερματίζει χωρίς επιτυχές αποτέλεσμα, αφού δεν υπάρχει λύση που να ικανοποιεί τους περιορισμούς. Σε αντίθετη περίπτωση, μεταξύ όλων των εφικτών λύσεων θα πρέπει να επιλεγεί εκείνη που βελτιστοποιεί την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Μια τέτοια λύση ονομάζεται βέλτιστη (optimal) και δεν είναι απαραίτητα μοναδική. Αυτή η διαδικασία λοιπόν, κατά την οποία αναζητούμε την καλύτερη (με βάση κάποιο ήδη δηλωμένο μέγεθος απόδοσης) μεταξύ ενός συνόλου εφικτών λύσεων, ονομάζεται **βελτιστοποίηση**.

Στη μαθηματική γλώσσα, μαθηματικός προγραμματισμός είναι ένα μαθηματικό μοντέλο στο οποίο επιχειρείται η βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) μιας ή περισσότερων γραμμικών ή μη-γραμμικών συναρτήσεων (κριτήρια βελτιστοποίησης) αγνώστων πραγματικών μεταβλητών των οποίων το πεδίο τιμών οριοθετείται έμμεσα από γραμμικούς ή μη-γραμμικούς περιορισμούς (ανισοεξισώσεις) συναρτήσεις των μεταβλητών αυτών. Οι άγνωστες μεταβλητές προσδιορίζουν (μοντελοποιούν) το αντικείμενο απόφασης του προβλήματος και ονομάζονται για το σκοπό αυτό μεταβλητές απόφασης. Ο μαθηματικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται από τους επιχειρησιακούς ερευνητές ή τους αναλυτές προβλημάτων απόφασης για την προσέγγιση προβλημάτων κατανομής περιορισμένων πόρων ή μέσων σε εναλλακτικές και ανταγωνιστικές μεταξύ τους δραστηριότητες κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Μεταξύ άλλων, τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες. Στα συνεχή, στα οποία οι μεταβλητές μπορούν να πάρουν συνεχείς τιμές, και στα διακριτά, στα οποία οι μεταβλητές μπορούν να πάρουν μόνο διακριτές τιμές. Στα συνεχή προβλήματα, υπάρχουν συνήθως άπειρες λύσεις και αναζητούμε μία λύση στην οποία οι μεταβλητές απόφασης επιτρέπεται να πάρουν οποιαδήποτε πραγματική τιμή. Στα διακριτά προβλήματα, αντίθετα, το σύνολο των λύσεων είναι συνήθως πεπερασμένο (μετρήσιμο, αν και συνήθως πολύ μεγάλο) και αναζητούμε μία λύση στην οποία οι μεταβλητές μπορούν να πάρουν μόνο διακριτές τιμές.

Ο Μαθηματικός προγραμματισμός διακρίνεται σε

- Γραμμικό Προγραμματισμό: περιλαμβάνει όλα τα προβλήματα για τα οποία τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και όλοι οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις (οι μεταβλητές εμφανίζονται μόνο στην πρώτη δύναμη και δεν υπάρχουν υψηλότερες δυνάμεις, ρίζες, γινόμενα μεταβλητών, κτλ.).
- Μη Γραμμικό Προγραμματισμό: όλα τα προβλήματα για τα οποία δεν ισχύει η γραμμικότητα ανήκουν στα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού
- Δυναμικό Προγραμματισμό: είναι εφαρμόσιμος όταν τα υποπροβλήματα που υπάρχουν δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Ένας αλγόριθμος που είναι προϊόν του δυναμικού προγραμματισμού,

επιλύει μία φορά κάθε υποπρόβλημα και αποθηκεύει αυτή τη λύση σε έναν πίνακα, στον οποίον θα καταφεύγει κάθε φορά που συναντά το συγκεκριμένο πρόβλημα. Αποτελεί μία πολύ ισχυρή τεχνική για αλγοριθμική επίλυση προβλημάτων.

Το μαθηματικό μοντέλο της εργασίας γίνεται με γραμμικό προγραμματισμό, γι' αυτό το λόγο θα παρουσιασθεί πιο αναλυτικά στην παράγραφο που ακολουθεί.

## **2.2 Γραμμικός Προγραμματισμός**

### **2.2.1 Γενικά**

Γραμμικός Προγραμματισμός είναι η διαδικασία εύρεσης μιας βέλτιστης λύσης μιας γραμμικής συνάρτησης, η οποία να είναι συμβατή με ένα πεπερασμένο σύνολο γραμμικών ανισοτήτων, δηλαδή ο γραμμικός προγραμματισμός περιγράφει ένα μοντέλο που αφορά τη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση μιας γραμμικής συνάρτησης κάτω από κάποιους γραμμικούς περιορισμούς (13). Από την οικονομική σκοπιά, ο γραμμικός προγραμματισμός είναι μια τεχνική που ασχολείται με το πρόβλημα της κατανομής των περιορισμένων πόρων ενός συστήματος σε ανταγωνιζόμενες δραστηριότητες κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο (καθώς και με άλλα προβλήματα με ανάλογη ή παραπλήσια διαμόρφωση). Θεωρείται ως μια από τις πιο σπουδαίες μαθηματικές ανακαλύψεις των μέσων χρόνων του εικοστού αιώνα και στις μέρες μας αποτελεί ένα μοντέλο ευρείας χρήσης για καθημερινά ζητήματα των περισσότερων μεσαίου και μεγάλου μεγέθους εμπορικών - βιομηχανικών εταιρειών. Ο όρος «προγραμματισμός» δεν έχει την έννοια του «προγραμματισμού ηλεκτρονικών υπολογιστών» αλλά αυτήν του «σχεδιασμού». Ο γραμμικός προγραμματισμός ασχολείται με τη σχεδίαση των δραστηριοτήτων του συστήματος που περιγράφει για να προκύψει το άριστο αποτέλεσμα, το αποτέλεσμα δηλαδή εκείνο, που μεταξύ όλων των δυνατών εναλλακτικών λύσεων πραγματώνει τον προκαθορισμένο σκοπό κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Ο γραμμικός προγραμματισμός παρουσιάζει, επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη θεωρητική πληροφορική. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση και την επίλυση πολλών συνδυαστικών προβλημάτων τα οποία εκ πρώτης όψεως δεν σχετίζονται με το γραμμικό προγραμματισμό. Έτσι, ο ελλειψοειδής αλγόριθμος (ο πρώτος αλγόριθμος πολυωνυμικού χρόνου για το γραμμικό προγραμματισμό) ή οι πιο πρόσφατες μέθοδοι των εσωτερικών σημείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποδοτική επίλυση πολλών συνδυαστικών προβλημάτων, όπως για παράδειγμα ο υπολογισμός βέλτιστων ροών σε ένα δίκτυο, η εύρεση ενός μέγιστου ταιριάσματος (maximal matching) σε ένα γράφο ή ενός χρωματισμού σε ένα τέλειο γράφημα. Η αρχική μαθηματική διατύπωση του προβλήματος καθώς και μια συστηματική διαδικασία λύσης του, η μέθοδος Simplex, οφείλεται στον G. B. Dantzig στα 1947.

Νωρίτερα διάφορα προβλήματα τύπου γραμμικού προγραμματισμού είχαν διαμορφωθεί και επιλυθεί. Τα σημαντικότερα από αυτά αφορούν το πρόβλημα μεταφοράς (Hitchcock 1941, Koopmans 1949) και το πρόβλημα της διαίτας (Stigler 1945). Ο Dantzig ήταν, όμως, ο άνθρωπος που κατασκεύασε το γενικό πλαίσιο και ταυτόχρονα ανακάλυψε μέθοδο επίλυσης του.

Πολλά από τα προβλήματα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε ανάγονται σε γραμμικά προβλήματα. Κλασικά παραδείγματα αποτελούν τα προβλήματα προγραμματισμού των πληρωμάτων σε μια αεροπορική εταιρία, ο υπολογισμός του συνδυασμού πρώτων υλών σε ένα εργοστάσιο που μεγιστοποιεί το κέρδος του τελικού προϊόντος, ή ο υπολογισμός των ροών αυτοκινήτων σε ένα οδικό δίκτυο, ή του φόρτου πληροφοριών σε ένα δίκτυο επικοινωνίας.

Ο Γραμμικός Προγραμματισμός είναι μια πολύ σημαντική κλάση προβλημάτων, τόσο από αλγοριθμική, όσο και από συνδυαστική σκοπιά. Από αλγοριθμική σκοπιά, ο αλγόριθμος Simplex προτάθηκε στη δεκαετία του 1940 (λίγο μετά τον πόλεμο) και, παρά το ότι λειτουργεί πολύ αποδοτικά στην πράξη, είναι γνωστό ότι έχει εκθετικό χρόνο εκτέλεσης στη χειρότερη περίπτωση. Από την άλλη πλευρά, όπως είναι ήδη γνωστό από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, όταν οι κλάσεις  $P$ ,  $NP$  ορίστηκαν, παρατηρήθηκε ότι ο γραμμικός προγραμματισμός ανήκει στην  $NP \cap co-NP$ , παρά το γεγονός ότι κανένας πολυωνυμικού χρόνου αλγόριθμος δεν ήταν γνωστός μέχρι τότε. Ο πρώτος πολυωνυμικού χρόνου αλγόριθμος, ο Ελλειψοειδής, ανακαλύφθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Ο αλγόριθμος του Καρμακαρ που ανακαλύφθηκε στη δεκαετία του 1980, οδήγησε στη συστηματική μελέτη των μεθόδων εσωτερικών σημείων για το γραμμικό προγραμματισμό.

Από συνδυαστικής άποψης, τα συστήματα γραμμικών ανισοτήτων μελετήθηκαν από τους Farkas και Minkovsky από τα τέλη του 19ου αιώνα. Ο γραμμικός προγραμματισμός, και ιδιαίτερα η δυϊκότητα, αποτελούν πολύ ισχυρά αποδεικτικά εργαλεία. Η δύναμη τους αξιοποιήθηκε ιδιαίτερα στους προσεγγιστικούς αλγορίθμους που μελετήθηκαν εκτενώς στη δεκαετία του 1990 και συνεχίζουν να μελετώνται εντατικά και σήμερα. Επίσης, στους αλγορίθμους δικτυακών ροών ο γραμμικός προγραμματισμός παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, τόσο αλγοριθμικά όσο και από συνδυαστικής απόψεως.

## 2.2.2 Μορφοποίηση Προβλημάτων

Αν κάποιος καταφέρει να προσαρμόσει το πρόβλημα του στο πρότυπο του γραμμικού προγραμματισμού, έχει στη διάθεση του ένα σύνολο εργαλείων, όχι μόνο για να βρει την καλύτερη λύση στο ερώτημα που τον απασχολεί, αλλά και για να προχωρήσει σε μια ανάλυση υποθέσεων για τις διάφορες παραμέτρους του προβλήματος. Εν τούτοις, κι αυτό είναι κάτι που δεν πρέπει ποτέ να ξεχνά κανείς καθώς βυθίζεται στις λεπτομέρειες της όποιας λύσης, το κύριο μέρος κάθε εφαρμογής

της Επιχειρησιακής Έρευνας είναι η **μοντελοποίηση**. Η λύση, ανεξάρτητα από το πόσο λεπτομερής ή εξεζητημένη είναι, έχει απλά έναν υποστηρικτικό ρόλο.

Το γραμμικό μοντέλο-πρότυπο, σχηματίζεται από τα εξής τρία βασικά συστατικά:

- τις μεταβλητές (αγνώστους) του προβλήματος,
- έναν αντικειμενικό στόχο που θα πρέπει να επιτευχθεί, και
- τους περιορισμούς που θα πρέπει να ενσωματώσουμε στις μεταβλητές ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες του προβλήματος.

Οι μεταβλητές είναι τα δομικά στοιχεία του προβλήματος που μπορεί να επηρεάσει ο αναλυτής. Για το λόγο αυτό συχνά αναφέρονται και ως μεταβλητές ελέγχου ή μεταβλητές απόφασης. Για παράδειγμα αναφέρεται μια αεροπορική εταιρεία η οποία πραγματοποιεί ταξίδια σε όλο τον κόσμο. Πολλές είναι οι μεταβλητές που υπάρχουν σ' ένα τέτοιο πρόβλημα. Μεταξύ τους, εύκολα μπορεί να γίνει αναφορά στους πιλότους οι οποίοι εξυπηρετούν τις διάφορες πτήσεις.

X1 = Πιλότος Α

X2 = Πιλότος Β

X3 = Πιλότος Γ

X4= ...

Το πρόβλημα αφορά βέβαια τον εντοπισμό τιμής για την κάθε μεταβλητή. Υπάρχει δηλαδή η ανάγκη ενός αντικειμενικού στόχου. Ο στόχος αυτός μπορεί να αφορά τη μεγιστοποίηση του κέρδους, την καλύτερη αξιοποίηση του εργατικού δυναμικού, ή την ελαχιστοποίηση του κόστους, της υπερωριακής απασχόλησης, κτλ. Γίνεται αναζήτηση εκείνων των τιμών των μεταβλητών ελέγχου οι οποίες θα βελτιστοποιήσουν το κριτήριο απόδοσης που ορίζεται σ' αυτό το στάδιο της μοντελοποίησης. Ο αντικειμενικός στόχος που θα οριστεί θα πρέπει να επιτευχθεί κάτω από τους συνθήκες λειτουργίας του συστήματος που μελετάμε. Περιορισμοί, όπως η ανεπάρκεια των πόρων του συστήματος (π.χ. πιλότοι, πτήσεις), η απορροφητικότητα της αγοράς, οι συμφωνίες με προμηθευτές και αγοραστές, οι χρόνοι παράδοσης των παραγόμενων προϊόντων κτλ., δημιουργούν αυτές τις συνθήκες. Αν η προαναφερόμενη εταιρεία ήταν σε θέση να εξασφαλίσει απεριόριστα χρήματα, έτσι ώστε να έχει στη διάθεση της όσους πιλότους χρειάζεται τα πράγματα θα ήταν εντελώς διαφορετικά. Στο στάδιο αυτό της μοντελοποίησης, πρέπει να γίνει εντοπισμός και καταγραφή του κριτηρίου βελτιστοποίησης σαν συνάρτηση των μεταβλητών απόφασης με όλους τους παράγοντες, οι οποίοι επιβάλλουν όρια στις τιμές τους και, συνεπώς, και στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Στο πρότυπο του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού τόσο ο αντικειμενικός στόχος, όσο και οι περιορισμοί εκφράζονται σαν γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης.

Στην παρούσα εργασία, οι μεταβλητές απόφασης που χρησιμοποιούνται είναι ακέραιες, γι' αυτό το λόγο στην επόμενη παράγραφο θα γίνει περιγραφή του Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού.

### 2.2.3 Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός

Ο ακέραιος προγραμματισμός ασχολείται με προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού στα οποία μερικές ή όλες οι μεταβλητές είναι ακέραιες (14). Ένα γενικό πρόβλημα θα έχει την εξής μορφή:

$$\max(\min) z = c_1 x + c_2 u$$

με περιορισμούς

$$A_1 x + A_2 u \geq (\leq, =) b$$

$u \geq 0$  και ακέραιο  $x \geq 0$ .

Όπου  $A_1$  είναι ένας  $m \times n_1$  πίνακας και  $A_2$  ένας  $m \times n_2$  πίνακας. Όταν  $n_1 = 0$  και  $c_1 = 0$ , τότε το πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, ενώ αν  $n_2 = 0$  και  $c_2 = 0$ , τότε το πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα ακεραίου προγραμματισμού. Τέλος αν  $n_1 \neq 0$  και  $n_2 \neq 0$  ή  $c_1 \neq 0$  και  $c_2 \neq 0$ , τότε το πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα μικτού ακεραίου προγραμματισμού.

Αν και αρκετοί αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί για προβλήματα ακεραίου προγραμματισμού, καμία από αυτές τις μεθόδους δεν είναι αξιόπιστη από υπολογιστική άποψη, ειδικότερα όταν ο αριθμός των μεταβλητών αυξάνει, σε αντίθεση με τον γραμμικό προγραμματισμό όπου προβλήματα με εκατοντάδες μεταβλητές και εκατοντάδες περιορισμούς μπορούν να λυθούν σε λογικό χρονικό διάστημα.

Η υπολογιστική αυτή δυσκολία που παρατηρείται στους αλγόριθμους επίλυσης προβλημάτων ακεραίου προγραμματισμού έχει οδηγήσει τους χρήστες να βρουν άλλες μεθόδους επίλυσης τέτοιων προβλημάτων. Μια τέτοια προσέγγιση είναι να λυθεί το πρόβλημα σαν ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού και στη συνέχεια να στρογγυλοποιηθεί η βέλτιστη λύση στις κοντινότερες ακέραιες τιμές. Πάντως, δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι η στρογγυλοποιημένη λύση θα ικανοποιεί τους περιορισμούς, ειδικότερα στην περίπτωση που υπάρχει ένας ή περισσότεροι περιορισμοί - ισότητες.

Από τη θεωρία του γραμμικού προγραμματισμού μία στρογγυλοποιημένη λύση δεν μπορεί να είναι εφικτή, αφού αυτό θα σήμαινε ότι μία βάση (με όλες τις μη βασικές μεταβλητές μηδέν) οδηγεί σε δύο διαφορετικές λύσεις. Η μη εφικτότητα που δημιουργείται από τη στρογγυλοποίηση μπορεί να είναι ανεκτή εφόσον οι παράμετροι του προβλήματος δεν είναι σαφείς. Αλλά, συνήθως σε ένα πρόβλημα ακεραίου προγραμματισμού υπάρχουν χαρακτηριστικοί τυπικοί περιορισμοί - ισότητες στις οποίες οι παράμετροι είναι σαφείς. Ένας τέτοιος περιορισμός είναι ο  $x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1$ , με  $x_j = 0$  ή  $1$  για  $j = 1, 2, \dots, n$ . Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις, η



στρογγυλοποίηση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και τότε ένας αλγόριθμος επίλυσης προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού είναι απαραίτητος.

Επιπλέον, στην ακαταλληλότητα της στρογγυλοποίησης δίνει έμφαση το γεγονός ότι αν και οι ακέραιες μεταβλητές θεωρούνται κοινώς ως αναπαράσταση ενός διακριτού αριθμού αντικειμένων (μηχανών, ανθρώπων, κ.τ.λ.), διάφορες κωδικοποιήσεις χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν τις ποσοτικοποιήσεις. Για παράδειγμα, μια απόφαση για χρηματοδότηση ή όχι ενός προγράμματος μπορεί να αναπαρασταθεί από την δυαδική μεταβλητή  $x = 0$  αν το πρόγραμμα απορρίπτεται ή  $x = 1$  αν αυτό γίνεται αποδεκτό.

Τέλος, σε περίπτωση που κάποιες από τις μεταβλητές ενός προβλήματος περιορίζονται σε ακέραιες τιμές και κάποιες όχι, έχουμε ένα πρόβλημα **μεικτού ακέραιου προγραμματισμού** (mixed integer programming). Όταν όλες περιορίζονται σε ακέραιες τιμές, έχουμε ένα πρόβλημα **αμιγώς ακέραιου προγραμματισμού** (pure integer programming). Ο **δυαδικός ακέραιος προγραμματισμός** (binary integer programming) είναι μία ειδική κατηγορία προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού, όπου οι μεταβλητές απόφασης μπορούν να πάρουν μόνο τιμές 0 ή 1.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται μόνο ακέραιες μεταβλητές, γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται αμιγώς ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός, ενώ κάποιες από τις μεταβλητές είναι δυαδικές.

## 2.2.4 Μοντελοποίηση

Η διαδικασία διαμόρφωσης ενός μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού ονομάζεται **μοντελοποίηση**. Πρόκειται για το πρώτο βασικό στάδιο προσέγγισης του προβλήματος απόφασης (το δεύτερο βασικό είναι η επίλυση του), το οποίο επιτρέπει στον αναλυτή (κατασκευαστής του μοντέλου) να αποκτήσει και να επεξεργαστεί λύσεις για το πρόβλημα. Ο αναλυτής του προβλήματος οφείλει να διαγνώσει, εάν το σύστημα απόφασης που μελετά επιδέχεται μοντελοποίηση με μαθηματικό προγραμματισμό. Κάτι τέτοιο είναι κατορθωτό εφόσον οι αποφάσεις μπορούν να αναλυθούν σε δραστηριότητες κατανομής πόρων, μέσων, ενεργειών, προϊόντων, υπηρεσιών, κ.λπ.

Κατά συνέπεια, όταν γίνεται λόγος για μοντελοποίηση προβλήματος απόφασης, ομιλούμε για μια τέχνη διάγνωσης, αξιοποίησης εμπειρίας, κατασκευής, καθώς και διαχείρισης μαθηματικών σχέσεων με στόχο τη δημιουργία ενός κατάλληλου, αποτελεσματικού και οικονομικά διαχειρίσιμου μαθηματικού οικοδομήματος.

Τέλος, τα προβλήματα απόφασης που καλείται κάποιος να μορφοποιήσει είναι:

- η κατανομή εργατικού δυναμικού,

- η κατανομή τεχνολογικού εξοπλισμού και πρώτων υλών σε διάφορες παραγωγικές διαδικασίες,
- η κατανομή κεφαλαίου σε διάφορα επενδυτικά προγράμματα,
- η ανάθεση σε περιορισμένο προσωπικό διαφόρων υπηρεσιών,
- η κατανομή καλλιεργήσιμης γης σε διάφορες αγροτικές δραστηριότητες, κ.λπ.

Το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα αυτών των αποφάσεων μπορεί να αφορά:

- τη μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους από πωλήσεις,
- την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής,
- τη μεγιστοποίηση της απασχόλησης,
- την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον, κ.λπ.

## 2.3 Επίλογος

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο βασίστηκε η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Αρχικά, περιγράφηκαν οι έννοιες της βελτιστοποίησης και του μαθηματικού προγραμματισμού, καθώς και τα στοιχεία ενός μαθηματικού μοντέλου, οι μεταβλητές απόφασης, οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση. Από τις υποκατηγορίες του μαθηματικού προγραμματισμού αναλύθηκε ο γραμμικός προγραμματισμός, στον οποίο εντάσσεται και το μαθηματικό μοντέλο της παρούσας εργασίας. Τέλος, έγινε ιδιαίτερη αναφορά στον ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό και στη διαδικασία της μοντελοποίησης.

### 3 Μαθηματικό Μοντέλο

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το πρόβλημα του σχεδιασμού ενός Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων, όπως αυτό προσεγγίστηκε στην παρούσα μελέτη. Ακολούθως, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε προκειμένου να επιλυθεί το εν λόγω πρόβλημα. Τέλος, επεξηγείται η μαθηματική μορφοποίηση ορισμένων περιορισμών.

#### 3.1 Περιγραφή του προβλήματος

Όπως προαναφέρθηκε, αντικείμενο του μαθηματικού μοντέλου είναι ο σχεδιασμός ενός Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων σε μια συγκεκριμένη πόλη, η οποία βρίσκεται κάθε φορά υπό μελέτη. Στην παράγραφο 1.3 περιγράφηκαν οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός τέτοιου δικτύου και οι οποίες ενσωματώθηκαν στο μαθηματικό μοντέλο.

Συγκεκριμένα, για τα δεδομένα του μαθηματικού μοντέλου χρειάζεται να έχει προκαθοριστεί μια σειρά από υποψήφιες τοποθεσίες των σταθμών ποδηλάτων, καθώς και μια εκτιμώμενη χρονικά μεταβαλλόμενη ζήτηση για ποδήλατα σε αυτές τις τοποθεσίες κατά τη διάρκεια μιας μέσης ημέρας. Αυτά τα δεδομένα είναι απαραίτητα προκειμένου να καθοριστεί πού χρειάζεται να τοποθετηθούν οι σταθμοί ποδηλάτων και πόσες θέσεις στάθμευσης και ποδήλατα θα πρέπει να έχει ο καθένας. Ο διαθέσιμος προϋπολογισμός της πόλης για την κατασκευή όλου του ΔΚΠ είναι προκαθορισμένος, όπως, επίσης, και το κόστος αγοράς ενός ποδηλάτου, μιας θέσης στάθμευσης και ενός σταθμού. Συνεπώς, είναι θέμα βελτιστοποίησης με τη χρήση του μοντέλου να αποφασιστεί πόσους σταθμούς, ποδήλατα και θέσεις στάθμευσης θα περιλάβει στη λύση του. Ο χρόνος περπατήματος μεταξύ των υποψήφιων τοποθεσιών είναι μία ακόμη παράμετρος του προβλήματος, η οποία χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει την εγγύτητα των σταθμών που θα εγκατασταθούν, όσο αυτό είναι δυνατό. Ο χρόνος περπατήματος προκύπτει διαιρώντας την πραγματική απόσταση μεταξύ των υποψήφιων τοποθεσιών με τη μέση ταχύτητα περπατήματος, η οποία έχει θεωρηθεί ότι είναι 4χμ/ώρα. Ως πραγματική απόσταση εννοείται η μικρότερη απόσταση μιας τοποθεσίας από μια άλλη ακολουθώντας τους δρόμους της πόλης ως πεζός. Έτσι, σε καμία περίπτωση δεν υπονοείται η απόσταση σε ευθεία γραμμή στο χάρτη ούτε, όμως, λαμβάνονται υπόψη μονοδρομήσεις που μπορεί να τροποποιήσουν την απόσταση, όταν αυτή καλύπτεται από όχημα.

Όσον αφορά τη ζήτηση σε κάθε τοποθεσία, διαιρείται σε «Ζήτηση για Παραλαβή», που είναι ο αριθμός των χρηστών που θα ήθελαν να λάβουν ένα ποδήλατο από το σταθμό (αν αυτός κατασκευαζόταν στη συγκεκριμένη τοποθεσία), και «Ζήτηση για Απόθεση», που είναι ο αριθμός των χρηστών που θα ήθελαν να αφήσουν ένα ποδήλατο στο σταθμό (αν αυτός κατασκευαζόταν στη συγκεκριμένη τοποθεσία). Η πρώτη μορφή ζήτησης θα επηρεάσει τον αριθμό των ποδηλάτων που

πρέπει να έχει ο κάθε σταθμός προκειμένου ο κάθε χρήστης να βρει ποδήλατο να παραλάβει. Η δεύτερη μορφή ζήτησης θα επηρεάσει τον αριθμό των κενών θέσεων στάθμευσης που πρέπει να έχει ο κάθε σταθμός προκειμένου ο κάθε χρήστης να βρει ελεύθερη θέση να αφήσει το ποδήλατό του. Ο συνδυασμός αυτών των δύο ζητήσεων θα οδηγήσει στο τελικό μέγεθος του κάθε σταθμού, δηλαδή στον αριθμό των θέσεων στάθμευσης που θα πρέπει να διαθέτει.

Το μέγεθος της ζήτησης πρέπει να αναφέρεται στη ζήτηση μιας ώρας. Αυτό το συμπέρασμα συνήχθη μετά από την επίλυση πολλών προβλημάτων με διάφορες χρονικές αναφορές ζήτησης. Σε ήδη εγκαταστημένα δίκτυα η μέση διάρκεια ενός ταξιδιού από τον ένα σταθμό στον άλλο με το ποδήλατο είναι 12 λεπτά (17). Ωστόσο, η αναγωγή της ζήτησης στα 12 λεπτά οδηγεί σε πολύ χαμηλές τιμές ζήτησης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σταθμών με λίγες θέσεις στάθμευσης και λίγα ποδήλατα, αφού αυτά θα επαρκούσαν για την κάλυψή της. Επειδή, όμως, η πρόβλεψη της ζήτησης ενέχει σφάλμα και η μεταβλητότητά της είναι σημαντική, οι σταθμοί πρέπει να είναι αρκετά μεγάλοι για να την καλύψουν σε κάθε περίπτωση. Επίσης, το 99% των ταξιδιών έχουν διάρκεια μικρότερη από 1 ώρα. Ανάγοντας, λοιπόν, τη ζήτηση στη μία ώρα, περιλαμβάνεται το σύνολο σχεδόν των ταξιδιών, με αποτέλεσμα οι τιμές της ζήτησης να είναι αρκετά μεγάλες και να οδηγήσουν σε μια λύση με μεγάλους σταθμούς. Έτσι, μοναδικός περιορισμός στο μέγεθος του κάθε σταθμού θα είναι το κόστος των θέσεων στάθμευσης και ο περιορισμός του κόστους δε θα είναι χαλαρός λόγω υψηλών απαιτήσεων ζήτησης.

Συνεπώς, οι εν λόγω μορφές ζήτησης θεωρούνται σε ωριαία κλίμακα στη διάρκεια μιας ημέρας. Η λογική με την οποία δημιουργήθηκε το μαθηματικό μοντέλο είναι ότι εκτιμώντας το προφίλ της ζήτησης που θα εμφανιστεί στη διάρκεια μιας μέσης ημέρας σε όλες τις υποψήφιες τοποθεσίες, το μοντέλο αποφασίζει ποια πρέπει να είναι η διαμόρφωση του δικτύου, ώστε να εξυπηρετηθεί η ζήτηση στο μεγαλύτερο τμήμα της. Οι 24 ώρες της ημέρας διακριτοποιούνται σε χρονικά διαστήματα της μιας ώρας, κατά τη διάρκεια των οποίων διαφορετικός αριθμός χρηστών έρχεται σε κάθε σταθμό, είτε για να πάρει είτε για να αφήσει ένα ποδήλατο.

## **3.2 Μαθηματικό Μοντέλο**

Το πρόβλημα διαμορφώθηκε ως ένα Αμιγώς Ακέραιο Γραμμικό Πρόβλημα. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε.

### **3.2.1 Δείκτες και Σύνολα**

Οι δείκτες και τα σύνολα που χρησιμοποιούνται στο μαθηματικό μοντέλο είναι τα εξής:

- $i, k \in N$  : Οι υποψήφιες τοποθεσίες σταθμών ποδηλάτων
- $t, p \in T$  : Τα χρονικά διαστήματα στη διάρκεια της ημέρας

### 3.2.2 Δεδομένα

Τα δεδομένα του μοντέλου είναι οι εξής:

- $\overline{CB}$  : Το κόστος αγοράς ενός ποδηλάτου
- $\overline{CS}$  : Το κόστος εγκατάστασης ενός σταθμού ποδηλάτων (χωρίς καμία θέση στάθμευσης)
- $\overline{CTH}$  : Το κόστος κατασκευής μίας θέσης στάθμευσης σε έναν εγκατεστημένο σταθμό
- $APE_{ik}$  : Ο χρόνος περπατήματος από την τοποθεσία  $i$  στην τοποθεσία  $k$  (σε λεπτά)
- $\overline{\maxper}$  : Ο μέγιστος χρόνος περπατήματος (σε λεπτά) μεταξύ δύο τοποθεσιών, από τις οποίες η μία έχει επιλεγεί για εγκατάσταση σταθμού και η άλλη όχι
- $\overline{BDG}$  : Ο συνολικός διαθέσιμος προϋπολογισμός για την εγκατάσταση όλου του Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων
- $\overline{DF}_{it}$  : Η «Ζήτηση για Παραλαβή» ποδηλάτων από την τοποθεσία  $i$  κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος  $t$
- $\overline{DE}_{it}$  : Η «Ζήτηση για Απόθεση» ποδηλάτων στην τοποθεσία  $i$  κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος  $t$
- $\overline{Zmin}$  : Ο ελάχιστος αριθμός θέσεων στάθμευσης που μπορεί να έχει ένας σταθμός ποδηλάτων
- $\overline{Zmax}$  : Ο μέγιστος αριθμός θέσεων στάθμευσης που μπορεί να έχει ένας σταθμός ποδηλάτων
- $\overline{perde}$  : Το ποσοστό της ζήτησης που μεταφέρεται από μια τοποθεσία που δεν επιλέχθηκε για εγκατάσταση σταθμού στον κοντινότερο εγκατεστημένο σταθμό. Γίνεται η θεώρηση ότι αν δεν εγκατασταθεί σταθμός σε μια τοποθεσία, μέρος της ζήτησής της χάνεται ( $1 - \overline{perde}$ )
- $\overline{CDT}$  : Το μοναδιαίο κόστος της μεταφοράς μιας μονάδας ζήτησης από μια

υποψήφια τοποθεσία χωρίς εγκατεστημένο σταθμό στον κοντινότερο σταθμό ανά λεπτό περπατήματος μεταξύ των δύο αυτών σημείων

$\overline{CDEMAND}$  : Το μοναδιαίο κόστος για μια μονάδα ανικανοποίητης ζήτησης

$\overline{M}$  : Ένας πολύ μεγάλος αριθμός

$\overline{m}$  : Ένας πολύ μικρός αριθμός

### 3.2.3 Μεταβλητές Απόφασης

Οι μεταβλητές απόφασης του μοντέλου είναι οι εξής:

$X_k$  : Δυαδική μεταβλητή που ισούται με 1 αν εγκαθίσταται σταθμός στην τοποθεσία k και 0 αν όχι

$Z_{ik}$  : Δυαδική μεταβλητή που ισούται με 1 αν η ζήτηση της υποψήφιας θέσης i εξυπηρετείται από τον εγκατεστημένο σταθμό στην τοποθεσία k και 0 αν όχι

$DN_k$  : Γενική ακέραια μεταβλητή που ισούται με τον αριθμό των κατασκευασμένων θέσεων στάθμευσης ποδηλάτων στο σταθμό k

$BN_{kt}$  : Γενική ακέραια μεταβλητή που ισούται με τον αριθμό των διαθέσιμων ποδηλάτων στο σταθμό k στην αρχή του χρονικού διαστήματος t

$BF_{kt}$  : Γενική ακέραια μεταβλητή που ισούται με τον αριθμό των ποδηλάτων που παραλαμβάνονται από το σταθμό k κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος t

$BE_{kt}$  : Γενική ακέραια μεταβλητή που ισούται με τον αριθμό των ποδηλάτων που αποτίθενται στο σταθμό k κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος t

$UDBinF_{kt}$  : Δυαδική μεταβλητή που ισούται με 1 αν ο σταθμός k δεν μπορεί να εξυπηρετήσει μερική «Ζήτηση για Παραλαβή» στο χρονικό διάστημα t (ανεπαρκής αριθμός διαθέσιμων ποδηλάτων) και 0 αν όχι

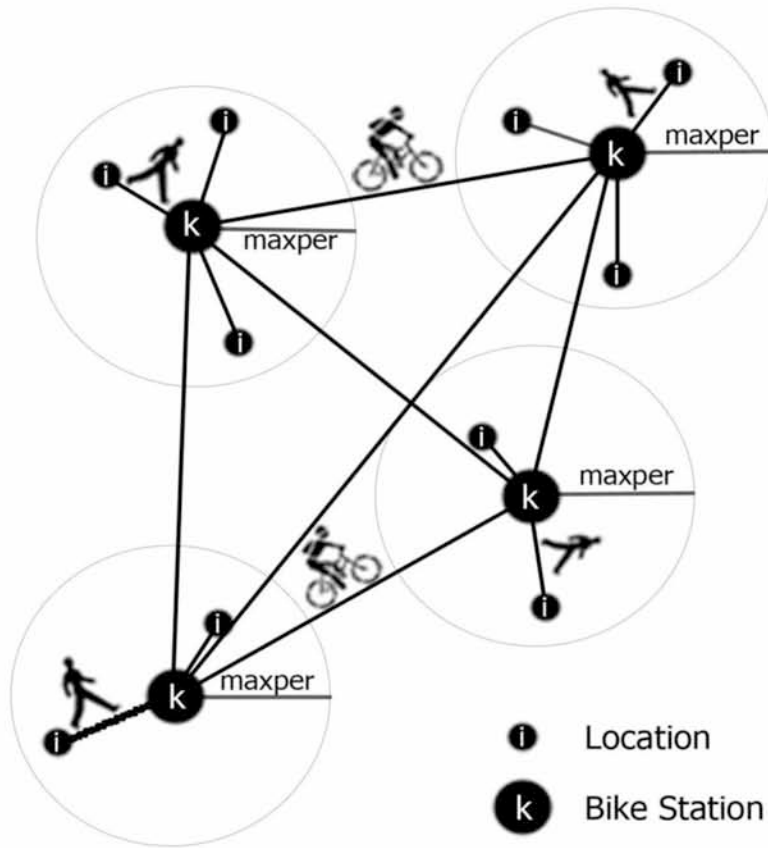
$UDBinE_{kt}$  : Δυαδική μεταβλητή που ισούται με 1 αν ο σταθμός k δεν μπορεί να εξυπηρετήσει μερική «Ζήτηση για Απόθεση» στο χρονικό διάστημα t (ανεπαρκής αριθμός ελεύθερων θέσεων στάθμευσης) και 0 αν όχι

### 3.2.4 Επεξήγηση της θεώρησης του μοντέλου

Σε αυτό το σημείο και πριν την παρουσίαση των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι απαραίτητη η αναλυτικότερη επεξήγηση του μοντέλου. Στο Σχήμα 3-1 παρουσιάζεται αναλυτικά η θεώρηση του Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων, όπως αυτή έγινε στην παρούσα εργασία.  $N$  τοποθεσίες  $i$  είναι προκαθορισμένες μαζί με τη «Ζήτηση για Παραλαβή» και τη «Ζήτηση για Απόθεση» της καθεμιάς. Ο χρόνος περπατήματος μεταξύ αυτών των  $N$  θέσεων είναι, επίσης, γνωστός. Συνεπώς, είναι θέμα βελτιστοποίησης πόσοι σταθμοί ποδηλάτων θα εγκατασταθούν και πού, ώστε κάθε τοποθεσία να έχει έναν κοντινό σταθμό. Οι περιοχές  $k$ , όπου είναι εγκατεστημένοι οι σταθμοί, είναι ένα υποσύνολο των τοποθεσιών  $i$ .

Εάν ο προϋπολογισμός δεν είναι αρκετός προκειμένου να εγκατασταθούν σταθμοί σε όλες τις  $N$  τοποθεσίες, σε ορισμένες περιοχές  $i$  δε θα εγκατασταθεί σταθμός. Αυτές οι περιοχές θα πρέπει να έχουν ένα κοντινό σταθμό  $k$ , ο οποίος πρέπει να βρίσκεται σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ( $\overline{\max_{per}}$ ) με τα πόδια. Όταν συμβαίνει αυτό, ένα ποσοστό ( $\overline{perde}$ ) της ζήτησης των  $i$  τοποθεσιών θεωρείται ότι μεταφέρεται σε αυτόν τον σταθμό  $k$ . Δηλαδή, κάποιοι υποψήφιοι πελάτες της περιοχής  $i$  προτίθενται να περπατήσουν ως το σταθμό  $k$  για να πάρουν ποδήλατο και να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο, παρ' όλο που δεν υπάρχει σταθμός στην περιοχή  $i$ , όπως θα επιθυμούσαν. Με τον τρόπο αυτό, θεωρείται ότι η περιοχή  $i$  εξυπηρετείται από το σταθμό  $k$ , δηλαδή  $Z_{ik} = 1$ . Η υπόλοιπη ζήτηση της περιοχής  $i$  δεν εξυπηρετείται, διότι θεωρείται ότι μερικοί πολίτες δε θα πάρουν ποδήλατο λόγω της απόστασης του σταθμού  $k$  από την περιοχή τους  $i$ . Συνεπώς, η παράμετρος  $\overline{perde}$  είναι ένα μέτρο της προθυμίας των πολιτών μιας πόλης να περπατήσουν για να πάρουν ποδήλατο, δηλαδή είναι ένα μέτρο της δημοτικότητας του ποδηλάτου ως μέσου μετακίνησης. Αν  $\overline{perde} \rightarrow 1$ , τότε αυτό σημαίνει ότι η δημοτικότητα του ποδηλάτου είναι υψηλή στην πόλη. Αν  $\overline{perde} \rightarrow 0$ , τότε η δημοτικότητα του ποδηλάτου είναι χαμηλή.

Από τη μία πλευρά, η μεταβίβαση της ζήτησης είναι αναπόφευκτη, διότι ο περιορισμένος προϋπολογισμός δεν επιτρέπει να εγκατασταθούν σταθμοί σε όλες τις θέσεις. Από την άλλη πλευρά, δεν είναι επιθυμητή, διότι αυτό σημαίνει ότι οι χρήστες του δικτύου θα πρέπει να περπατήσουν από την τοποθεσία  $i$ , όπου θα προτιμούσαν να υπάρχει σταθμός, στον εγκατεστημένο σταθμό  $k$  και το αντίστροφο. Αυτό θα οδηγούσε σε κακή ποιότητα των υπηρεσιών που προσφέρονται στους χρήστες του Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων, κι έτσι κάποιοι πιθανοί πελάτες δε θα χρησιμοποιήσουν τελικά το δίκτυο.



Σχήμα 3-1: Σχηματική αναπαράσταση του ΔΚΠ, όπως αυτό θεωρείται από το μαθηματικό μοντέλο

### 3.2.5 Αντικειμενική Συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου είναι ελαχιστοποίηση τριών όρων:

$$\begin{aligned}
 MINIMIZE : & \overline{CDT} * \overline{perde} * \sum_i \sum_k \sum_t (\overline{DF_{it}} + \overline{DE_{it}}) * Z_{ik} * \overline{APE_{ik}} + \\
 & + \overline{CDEMAND} * (\sum_t \sum_k \overline{DF_{kt}} - \overline{BF_{kt}}) + \\
 & + \overline{CDEMAND} * (\sum_t \sum_k \overline{DE_{kt}} - \overline{BE_{kt}})
 \end{aligned}$$

3-1



Ο πρώτος όρος εκφράζει την μέγεθος της ζήτησης που μεταφέρεται από την τοποθεσία  $i$  στο σταθμό  $k$  από τον οποίο εξυπηρετείται. Η περιοχή  $i$  απέχει συγκεκριμένο χρόνο περπατήματος από το σταθμό  $k$ . Έτσι, το μοντέλο θα προτείνει μια πυκνή κατανομή των σταθμών, μη εγκαθιστώντας σταθμούς σε περιοχές με χαμηλή ζήτηση εξασφαλίζοντας ότι αυτοί βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά σε ένα σταθμό. Αυτός ο όρος πολλαπλασιάζεται με το μοναδιαίο κόστος  $\overline{CDT}$  για να διαφοροποιηθεί το μέγεθος της βαρύτητάς του από τους άλλους δύο όρους.

Ο δεύτερος και ο τρίτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης εισάγονται για την ελαχιστοποίηση της ανικανοποίητης ζήτησης. Υπάρχει διαφορά ανάμεσα στις παραμέτρους  $\overline{DF}_{kt}$  και  $\overline{DE}_{kt}$  και στις μεταβλητές απόφασης  $BF_{kt}$  και  $BE_{kt}$ . Οι πρώτες εκφράζουν τους χρήστες που θα επιθυμούσαν να παραλάβουν ή να αποθέσουν ένα ποδήλατο από και προς σε μια υποψήφια τοποθεσία σταθμού αντίστοιχα. Ωστόσο, ο σταθμός  $k$  μπορεί να μη διαθέτει τα απαιτούμενα ποδήλατα ή τις απαιτούμενες ελεύθερες θέσεις στάθμευσης για να εξυπηρετήσουν αυτούς τους δύο τύπους της ζήτησης αντίστοιχα. Έτσι, ο αριθμός των ποδηλάτων που τελικά παραλαμβάνονται ή αποτίθενται σε ένα σταθμό  $k$  εκφράζεται από τις δύο μεταβλητές που αναφέρθηκαν και μπορεί να είναι ίσος ή και μικρότερος από τη ζήτηση. Τόσο οι παράμετροι όσο και οι μεταβλητές αναφέρονται σε κάθε χρονικό διάστημα  $t$ . Αυτοί οι δύο όροι πολλαπλασιάζονται με το ίδιο μοναδιαίο κόστος  $\overline{CDEMAND}$  που σημαίνει ότι δεν δίνεται διαφορετική βαρύτητα σε κανένα από τους δύο.

Ο στόχος του μοντέλου δεν είναι μόνο να καλύψει όσο το δυνατόν περισσότερη ζήτηση (δεύτερος και τρίτος όρος), αλλά επίσης και να παράσχει τις καλύτερες υπηρεσίες στους χρήστες. Για το λόγο αυτό, εισάγεται ο πρώτος όρος έτσι ώστε μόνο λίγοι πελάτες από τις τοποθεσίες  $i$  χωρίς σταθμό ( $\overline{perde} * (\overline{DF}_{it} + \overline{DE}_{it})$ ) θα πρέπει να περπατήσουν για ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα ( $\overline{APE}_{ik}$ ) στο σταθμό  $k$  ( $Z_{ik}$ ). Διαφορετικά, χωρίς τον όρο αυτό το μοντέλο προτείνει λύση όπου οι περιοχές υψηλής ζήτησης εξυπηρετούνται από όχι και τόσο κοντινούς σταθμούς χαμηλής ζήτησης.

Οι τρεις όροι πολλαπλασιάζονται με μια παράμετρο προκειμένου να εκφράζονται στην ίδια μονάδα (€). Έτσι, οι μονάδες του  $\overline{CDT}$  είναι (€ / πελάτη / λεπτό) και οι μονάδες του  $\overline{CDEMAND}$  είναι (€ / πελάτη). Η δεύτερη και η τρίτη περίοδος πολλαπλασιάζονται με το ίδιο μοναδιαίο κόστος  $\overline{CDEMAND}$  που σημαίνει ότι δεν δίνεται διαφορετική βαρύτητα είτε στη «Ζήτηση για Παραλαβή» είτε στη «Ζήτηση για Απόθεση» ποδηλάτων. Δηλαδή, σκοπός του μοντέλου είναι η ικανοποίηση και των δύο μορφών ζήτησης εξίσου.

### 3.2.6 Περιορισμοί

Το πρόβλημα υπόκειται στους παρακάτω περιορισμούς:

$$\overline{CB} * \sum_k BN_{kt_0} + \overline{CS} * \sum_k X_k + \overline{CTH} * \sum_k DN_k \leq \overline{BDG} \quad (1)$$

$$X_k * \overline{Z \min} \leq DN_k \leq X_k * \overline{Z \max}, \forall k \quad (2)$$

$$BN_{kt} \leq DN_k, \forall k, t \quad (3)$$

$$\sum_k BN_{kt} \leq \sum_k BN_{kt_0}, \forall t \quad (4)$$

$$BN_{kt+1} = BN_{kt} + BE_{kt} - BF_{kt}, \forall k, t \quad (5)$$

$$Z_{ik} \leq X_k, \forall i, k \quad (6)$$

$$X_k \leq Z_{kk}, \forall k \quad (7)$$

$$\sum_k Z_{ik} = 1, \forall i \quad (8)$$

$$Z_{ik} \leq \frac{\overline{\max per}}{\overline{APE_{ik}}}, \forall i, k, i \neq k \quad (9)$$

$$BF_{kt} \leq BN_{kt}, \forall k, t \quad (10)$$

$$BE_{kt} \leq DN_k - BN_{kt}, \forall k, t \quad (11)$$

$$BF_{kt} \leq \overline{DF}_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * \overline{DF}_{it} * \overline{perde} \right), \forall k, t \quad (12)$$

$$BE_{kt} \leq \overline{DE}_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * \overline{DE}_{it} * \overline{perde} \right), \forall k, t \quad (13)$$

$$\left[ \overline{DF}_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * \overline{DF}_{it} * \overline{perde} \right) - BN_{kt} \right] * \overline{m} \leq \text{UDBinF}_{kt} \leq 1 + \left[ \overline{DF}_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * \overline{DF}_{it} * \overline{perde} \right) - BN_{kt} \right] * \overline{m}, \forall k, t \quad (14)$$

$$\left[ \overline{DE}_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * \overline{DE}_{it} * \overline{perde} \right) - (DN_k - BN_{kt}) \right] * \overline{m} \leq \text{UDBinE}_{kt} \leq 1 + \left[ \overline{DE}_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * \overline{DE}_{it} * \overline{perde} \right) - (DN_k - BN_{kt}) \right] * \overline{m}, \forall k, t \quad (15)$$

$$\overline{DF}_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * \overline{DF}_{it} * \overline{perde} \right) - \overline{M} * \text{UDBinF}_{kt} \leq BF_{kt} \leq \overline{DF}_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * \overline{DF}_{it} * \overline{perde} \right) + \overline{M} * \text{UDBinF}_{kt}, \forall k, t \quad (16)$$

$$BN_{kt} - \overline{M} * (1 - \text{UDBinF}_{kt}) \leq BF_{kt} \leq BN_{kt} + \overline{M} * (1 - \text{UDBinF}_{kt}), \forall k, t \quad (17)$$

$$\overline{DE}_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * \overline{DE}_{it} * \overline{perde} \right) - \overline{M} * (\text{UDBinE}_{kt} + \overline{DD}_t) \leq BE_{kt} \leq \overline{DE}_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * \overline{DE}_{it} * \overline{perde} \right) + \overline{M} * (\text{UDBinE}_{kt} + \overline{DD}_t), \forall k, t \quad (18)$$

$$(DN_k - BN_{kt}) - \overline{M} * (1 - \text{UDBinE}_{kt} + \overline{DD}_t) \leq BE_{kt} \leq (DN_k - BN_{kt}) + \overline{M} * (1 - \text{UDBinE}_{kt} + \overline{DD}_t), \forall k, t \quad (19)$$

$$X_k = \{0, 1\}, \forall k \quad (20)$$

$$Z_{ik} = \{0, 1\}, \forall i, k \quad (21)$$

$$\text{UDBinF}_{kt} = \{0, 1\}, \forall k, t \quad (22)$$

$$\text{UDBinE}_{kt} = \{0, 1\}, \forall k, t \quad (23)$$

$$DN_k \geq 0, \forall k \text{ general integer} \quad (24)$$

$$BN_{kt} \geq 0, \forall k, t \text{ general integer} \quad (25)$$

$$BE_{kt} \geq 0, \forall k, t \text{ general integer} \quad (26)$$

$$BF_{kt} \geq 0, \forall k, t \text{ general integer} \quad (27)$$

Ο περιορισμός (1) εγγυάται ότι το συνολικό κόστος εγκατάστασης όλων των σταθμών, της κατασκευής όλων των θέσεων στάθμευσης σε αυτούς, καθώς και της αγοράς όλων των ποδηλάτων δεν υπερβαίνει το διαθέσιμο προϋπολογισμό. Ο περιορισμός (2) εξασφαλίζει ότι οι θέσεις στάθμευσης των ποδηλάτων σε κάθε εγκατεστημένο σταθμό είναι μεταξύ της επιτρεπόμενης ελάχιστης και μέγιστης τιμής. Ο περιορισμός (3) εξασφαλίζει ότι σε όλα τα χρονικά διαστήματα, κάθε σταθμός δε μπορεί να έχει περισσότερα ποδήλατα από τον αριθμό των θέσεων στάθμευσής του.

Ο περιορισμός (4) σημαίνει ότι σε όλα τα χρονικά διαστήματα ο συνολικός αριθμός των ποδηλάτων σε όλους τους σταθμούς δε θα υπερβαίνει το συνολικό αριθμό των ποδηλάτων του πρώτου χρονικού διαστήματος. Αυτός ο περιορισμός εισάγεται, διότι το πρώτο χρονικό διάστημα ορίζεται από τις 4-5πμ, κι έτσι στις 4 το πρωί όλα τα ποδήλατα θεωρείται ότι είναι σταθμευμένα στους σταθμούς και κανένας χρήστης δεν κρατά κάποιο ποδήλατο. Κατά τη διάρκεια της ημέρας ο χρήστης μπορεί να κρατήσει ένα ποδήλατο για περισσότερο από τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος και να το επιστρέψει σε ένα σταθμό σε μεταγενέστερο χρονικό διάστημα. Αυτό συμβαίνει σύμφωνα με την ωριαία κατανομή της «Ζήτησης για Παραλαβή» και της «Ζήτησης για Απόθεση» ποδηλάτων σε όλους τους σταθμούς του δικτύου. Έτσι, μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα  $t$ , λόγω της μεγαλύτερης «Ζήτησης για Παραλαβή» από τη «Ζήτηση για Απόθεση» ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων ποδηλάτων σε όλους τους σταθμούς θα είναι μικρότερος από τον αρχικό αριθμό. Στη συνέχεια, σε ένα μεταγενέστερο χρονικό διάστημα  $t' > t$ , εξαιτίας της μεγαλύτερης «Ζήτησης για Παραλαβή» από τη «Ζήτηση για Απόθεση» ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων ποδηλάτων σε όλους τους σταθμούς θα είναι μεγαλύτερος από εκείνον του χρονικού διαστήματος  $t$ , αλλά δε θα είναι μεγαλύτερος από το συνολικό αριθμό των ποδηλάτων στο χρονικό διάστημα  $t_0$ . Ο περιορισμός αυτός εξασφαλίζει επίσης ότι το μοντέλο δεν προσθέτει ποδήλατα στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της ημέρας, δηλαδή το δίκτυο κοινόχρηστων ποδηλάτων είναι ένα κλειστό δίκτυο.

Ο περιορισμός (5) εκφράζει ότι ο αριθμός των ποδηλάτων στο σταθμό  $k$  στην αρχή του χρονικού διαστήματος  $t+1$  είναι ίσος με τον αριθμό των ποδηλάτων που είχε στην αρχή του χρονικού διαστήματος  $t$  συν τα ποδήλατα που αποτίθενται μείον αυτά που παραλαμβάνονται κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος  $t$ .

Ο περιορισμός (6) εγγυάται ότι μια τοποθεσία  $i$  δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από την τοποθεσία  $k$ , αν δεν έχει κατασκευαστεί σταθμός στην τοποθεσία  $k$ . Ο περιορισμός (7) εγγυάται ότι, εάν ένας σταθμός έχει κατασκευαστεί στην τοποθεσία  $k$

αυτή η τοποθεσία θα πρέπει να εξυπηρετείται από δικό της σταθμό. Ο περιορισμός (8) διασφαλίζει ότι κάθε τοποθεσία  $i$  μπορεί να εξυπηρετείται ακριβώς από ένα σταθμό ποδηλάτων  $k$ . Ο περιορισμός (9) εκφράζει ότι ένας εγκατεστημένος σταθμός  $k$  μπορεί να εξυπηρετήσει μόνο τοποθεσίες που βρίσκονται μέσα σε ένα μέγιστο χρόνο περπατήματος από αυτόν.

Ο περιορισμός (10) εξασφαλίζει ότι σε κάθε χρονικό διάστημα τα ποδήλατα που μπορούν να φύγουν από τον σταθμό δε μπορεί να είναι περισσότερα από τα διαθέσιμα. Ο περιορισμός (11) εξασφαλίζει ότι σε κάθε χρονικό διάστημα τα ποδήλατα που μπορούν να έρθουν σε ένα σταθμό δεν μπορεί να είναι περισσότερα από τις ελεύθερες θέσεις στάθμευσης. Ο περιορισμός (12) εκφράζει ότι σε κάθε χρονικό διάστημα τα ποδήλατα που μπορούν να παραληφθούν από ένα σταθμό δεν μπορεί να είναι περισσότερα από τη «Ζήτηση για Παραλαβή» αυτού του σταθμού, συν το ποσοστό της ζήτησης των περιοχών που εξυπηρετεί ο σταθμός αυτός, δηλαδή δεν μπορούν να φύγουν περισσότερα ποδήλατα από αυτά που ζητούνται. Ο περιορισμός (13) εκφράζει το ίδιο με το προηγούμενο, αλλά για τη «Ζήτηση για Απόθεση» και τα ποδήλατα που έρχονται στους σταθμούς.

Ο περιορισμός (14) αναγκάζει τη μεταβλητή  $UDBinF_{kt}$  να είναι ίση με 1, εάν ένας σταθμός  $k$  δεν μπορεί να εξυπηρετήσει μέρος της «Ζήτησης για Παραλαβή» κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος  $t$  και διαφορετικά 0. Ο περιορισμός (15) αναγκάζει τη μεταβλητή  $UDBinE_{kt}$  να είναι ίση με 1, εάν ένας σταθμός  $k$  δεν μπορεί να εξυπηρετήσει μέρος της «Ζήτησης για Απόθεση» κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος  $t$  και διαφορετικά 0.

Οι περιορισμοί (16) και (17) εγγυώνται ότι αν υπάρχει ανικανοποίητη «Ζήτηση για Παραλαβή», όλα τα διαθέσιμα ποδήλατα θα φύγουν από το σταθμό και αν δεν υπάρχει ανικανοποίητη «Ζήτηση για Παραλαβή», όλη η ζήτηση ικανοποιείται.

Οι περιορισμοί (18) και (19) εγγυώνται ότι αν υπάρχει ανικανοποίητη «Ζήτηση για Απόθεση», όλα τα ποδήλατα θα γεμίσουν τις διαθέσιμες θέσεις και αν δεν υπάρχει ανικανοποίητη «Ζήτηση για Απόθεση», όλη η ζήτηση θα πρέπει να ικανοποιείται. Αυτοί οι δύο περιορισμοί είναι χαλαροί, εάν η «Ζήτηση για Απόθεση» είναι μεγαλύτερη από τη «Ζήτηση για Παραλαβή» μέχρι το χρονικό διάστημα  $p$  ( $\overline{DD}_p = 1$ ), η οποία είναι διαστρέβλωση της εκτιμώμενης ζήτησης. Αυτό συμβαίνει όταν, εξαιτίας των παραμέτρων  $\overline{DF}_{it}$  και  $\overline{DE}_{it}$  εκτιμάται ότι μέχρι το χρονικό διάστημα  $t$  ο συνολικός αριθμός των χρηστών που θέλουν να αφήσουν ένα ποδήλατο σε όλους τους σταθμούς είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των χρηστών που έχουν ήδη πάρει ένα ποδήλατο, γεγονός που δεν είναι λογικό. Το δίκτυο κοινόχρηστων ποδηλάτων είναι ένα κλειστό δίκτυο, έτσι σε όλα τα χρονικά διαστήματα οι χρήστες που θέλουν να φθάσουν σε όλες τις τοποθεσίες δεν μπορεί να είναι περισσότεροι από αυτούς που έχουν ήδη φύγει από αυτές. Με την εισαγωγή αυτής της παραμέτρου σε αυτούς τους δύο περιορισμούς το μοντέλο δεν είναι υποχρεωμένο να καλύπτει το

σύνολο της «Ζήτησης για Απόθεση» στα χρονικά διαστήματα στα οποία συμβαίνει αυτό .

Τέλος, οι περιορισμοί (20), (21), (22), (23), και (24), (25), (26), (27) καλύπτουν την ακεραιότητα και τη μη αρνητικότητα, αντιστοίχως.

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να εξηγηθεί πώς το μοντέλο αποφασίζει τον αριθμό των θέσεων στάθμευσης ενός σταθμού ( $DN_k$ ) και τα ποδήλατά του στο πρώτο χρονικό διάστημα ( $BN_{kt_0}$ ). Δίνοντας τιμές σε αυτές τις δύο μεταβλητές υπολογίζονται οι τιμές των μεταβλητών  $UDBinF_{kt}$  και  $UDBinE_{kt}$  (περιορισμοί (14) και (15)). Οι τελευταίες μεταβλητές καθορίζουν τον αριθμό των ποδηλάτων που θα φύγουν ή θα έρθουν στο σταθμό  $k$  στο πρώτο χρονικό διάστημα ( $BF_{kt_0}$  και  $BE_{kt_0}$  περιορισμοί (16) έως (19)). Αυτές οι μεταβλητές καθορίζουν τα διαθέσιμα ποδήλατα του σταθμού  $k$  κατά την έναρξη του επόμενου χρονικού διαστήματος  $t_1$  ( $BN_{kt_1}$ , περιορισμός (5)), κ.ο.κ.. Έχοντας ως σκοπό την ελαχιστοποίηση της ανικανοποίητης ζήτησης το μοντέλο προτείνει εκείνες τις τιμές των μεταβλητών  $DN_k$  και  $BN_{kt_0}$  σε κάθε σταθμό που θα οδηγήσουν σε κατάλληλο αριθμό των διαθέσιμων ποδηλάτων και των ελεύθερων θέσεων στάθμευσης στα επόμενα χρονικά διαστήματα δεδομένης της διαφορετικής κατανομής της ζήτησης του σταθμού κατά τη διάρκεια της ημέρας.

### 3.2.6.1 Μαθηματική ανάλυση των περιορισμών

Στην παράγραφο αυτή θα επιχειρηθεί μια μαθηματική ανάλυση των περιορισμών προκειμένου να επεξηγηθεί η λογική με την οποία αναπτύχθηκαν σε αυτή τη μορφή. Η μαθηματική διατύπωση ορισμένων περιορισμών γίνεται εύκολα κατανοητή και για το λόγο αυτό δε θα αναλυθεί περαιτέρω. Αυτοί οι περιορισμοί είναι οι (1), (3), (4), (5), (8), (10), (11), (12), (13) και (20) ως και (27). Για τους υπόλοιπους θα επιχειρηθεί μια εκτενέστερη επεξήγηση της μαθηματικής τους διατύπωσης.

Στον περιορισμό (2) οι παράμετροι  $Z_{\min}$  και  $Z_{\max}$  πολλαπλασιάζονται με τη δυαδική μεταβλητή  $X_k$ , παρόλο που αυτό, αρχικά, μπορεί να μη φαίνεται απαραίτητο. Με αυτόν τον τρόπο αν σε μια τοποθεσία  $k$  εγκατασταθεί σταθμός ( $X_k = 1$ ), τότε οι θέσεις στάθμευσής του πρέπει να είναι μεταξύ  $Z_{\min}$  και  $Z_{\max}$ . Αντίθετα, αν μια τοποθεσία  $k$  δεν επιλεγεί για εγκατάσταση σταθμού ( $X_k = 0$ ), τότε ο αριθμός των θέσεων στάθμευσής της φράσσεται μεταξύ του 0 και του 0, άρα ισούται με 0. Δηλαδή, οι τοποθεσίες χωρίς σταθμό δεν έχουν θέσεις στάθμευσης, γεγονός που είναι λογικό. Αν οι εν λόγω παράμετροι δεν πολλαπλασιάζονταν με τη

δυναδική μεταβλητή  $X_k$ , όλες οι τοποθεσίες θα είχαν θέσεις στάθμευσης, ανεξάρτητα αν έχουν επιλεγεί ή όχι για εγκατάσταση σταθμού, γεγονός που δεν είναι λογικό για τοποθεσίες χωρίς σταθμό.

Στον περιορισμό (6) αν εγκατασταθεί σταθμός στην τοποθεσία  $k$  ( $X_k=1$ ), τότε αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξυπηρετήσει τοποθεσίες  $i$  χωρίς σταθμό, αλλά μπορεί και να μη χρησιμοποιηθεί ( $Z_{ik}=1$  ή  $Z_{ik}=0$ ). Ωστόσο, αν δεν εγκατασταθεί σταθμός στην τοποθεσία  $k$  ( $X_k=0$ ), η τοποθεσία  $k$  δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άλλες τοποθεσίες  $i$  ( $Z_{ik}=0$ ), αφού δεν έχει σταθμό. Ο ίδιος περιορισμός ισχύει και αντίστροφα.

Ο περιορισμός (7) εισήχθη στο μοντέλο, διότι χωρίς αυτόν οι λύσεις που προέκυπταν οδηγούσαν τοποθεσίες όπου έχει εγκατασταθεί σταθμός να εξυπηρετούνται από άλλους κοντινούς εγκατεστημένους σταθμούς, γεγονός το οποίο δεν είναι λογικό. Με τον περιορισμό αυτό εξασφαλίστηκε ότι όταν  $X_k=1$ , η τοποθεσία  $k$  θα εξυπηρετείται από τον ίδιο της τον σταθμό ( $Z_{kk}=1$ ).

Ο περιορισμός (9) είναι αυτός που εξασφαλίζει την ακτίνα γύρω από κάθε εγκαταστημένο σταθμό, εντός της οποίας, αν υπάρχει μια τοποθεσία χωρίς σταθμό, μπορεί να εξυπηρετηθεί από αυτόν. Συγκεκριμένα, έστω ότι η παράμετρος  $\maxper$  ορίζεται στα 7 λεπτά. Αυτό σημαίνει ότι ένας εγκατεστημένος σταθμός μπορεί να εξυπηρετήσει τη ζήτηση μιας τοποθεσίας χωρίς σταθμό, μόνο αν αυτή είναι εντός 7 λεπτών χρόνου περπατήματος. Έτσι, έστω ότι μια τοποθεσία  $i$  απέχει από μια άλλη  $k$  4 λεπτά ( $APE_{ik}=4$ ). Τότε, το κλάσμα  $\frac{\maxper}{APE_{ik}} = \frac{7}{4} = 1.75 > 1$ . Συνεπώς, μπορεί  $Z_{ik}=1$  ή  $Z_{ik}=0$ , δηλαδή η τοποθεσία  $i$  μπορεί να εξυπηρετηθεί από το σταθμό  $k$ . Αντίθετα, αν μια τοποθεσία  $i$  απέχει από μια άλλη  $k$  9 λεπτά ( $APE_{ik}=9$ ), τότε το κλάσμα  $\frac{\maxper}{APE_{ik}} = \frac{7}{9} = 0.78 < 1$ . Δηλαδή,  $Z_{ik} \leq 0.78 \Rightarrow Z_{ik}=0$ , δηλαδή η τοποθεσία  $i$  δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από το σταθμό  $k$ .

Ο περιορισμός (14) εξασφαλίζει τις τιμές της μεταβλητής  $UDBinF_{kt}$ . Η μεταβλητή αυτή εισήχθη στο μοντέλο για να φαίνεται σε ποιους σταθμούς  $k$  και σε ποια χρονικά διαστήματα  $t$  δεν μπορεί να ικανοποιηθεί η «Ζήτηση για Παραλαβή». Για παράδειγμα, έστω ότι η «Ζήτηση για Παραλαβή» σε ένα σταθμό  $k$  το χρονικό διάστημα  $t$  είναι 10 ποδήλατα και ο σταθμός διαθέτει 7 ποδήλατα στην αρχή εκείνου του χρονικού διαστήματος. Δηλαδή:

$$DF_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * DF_{it} * perde \right) > BN_{kt} \Rightarrow DF_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * DF_{it} * perde \right) - BN_{kt} = 10 - 7 = 3$$

Ο αριθμός  $m$  είναι ένας πολύ μικρός αριθμός της τάξης του 0,001. Τότε, ο περιορισμός (14) γίνεται  $0.003 \leq \text{UDBinF}_{kt} \leq 1.003 \Rightarrow \text{UDBinF}_{kt} = 1$ . Άρα, στο συγκεκριμένο σταθμό στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υπάρχει ανικανοποίητη «Ζήτηση για Παραλαβή».

Αντίθετα, αν η «Ζήτηση για Παραλαβή» στο σταθμό  $k$  το χρονικό διάστημα  $t$  είναι 5 ποδήλατα και ο σταθμός διαθέτει 7 ποδήλατα, τότε:

$$DF_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * DF_{it} * perde \right) < BN_{kt} \Rightarrow DF_{kt} + \left( \sum_{i \neq k} Z_{ik} * DF_{it} * perde \right) - BN_{kt} = 5 - 7 = -2$$

$\Rightarrow -0.002 \leq \text{UDBinF}_{kt} \leq 0.998 \Rightarrow \text{UDBinF}_{kt} = 0$ . Άρα, στο συγκεκριμένο σταθμό το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μπορεί να ικανοποιηθεί η «Ζήτηση για Παραλαβή». Αντίστοιχος είναι και ο περιορισμός (15) για τη «Ζήτηση για Απόθεση» και τη μεταβλητή  $\text{UDBinE}_{kt}$ .

Ο περιορισμός (16) εξασφαλίζει ότι σε ένα σταθμό  $k$  το χρονικό διάστημα  $t$  θα παραληφθούν τόσα ποδήλατα όση και η «Ζήτηση για Παραλαβή», όταν δεν υπάρχει ανικανοποίητη ζήτηση. Συγκεκριμένα, έστω ότι η «Ζήτηση για Παραλαβή» είναι 5 και τα διαθέσιμα ποδήλατα είναι 7 ( $\text{UDBinF}_{kt} = 0$ ). Τότε, ο περιορισμός αυτός γίνεται  $5 - 0 \leq BF_{kt} \leq 5 + 0 \Rightarrow BF_{kt} = 5$  ποδήλατα. Δηλαδή, ο σταθμός διέθετε 7 ποδήλατα και ήρθαν 5 πελάτες και πήραν τα 5 από τα 7. Όταν η «Ζήτηση για Παραλαβή» είναι 10 και τα διαθέσιμα ποδήλατα είναι 7 ( $\text{UDBinF}_{kt} = 1$ ), τότε ο περιορισμός είναι χαλαρός και δε δεσμεύει την τιμή της μεταβλητής  $BF_{kt}$ . Δηλαδή, ο περιορισμός γίνεται:  $10 - 1000 \leq BF_{kt} \leq 10 + 1000 \Rightarrow -990 \leq BF_{kt} \leq 1010$ , που ισχύει πάντοτε αφού η μεταβλητή  $BF_{kt}$  είναι θετική και σίγουρα μικρότερη από 1010, αφού ένας σταθμός δεν μπορεί να έχει τόσα ποδήλατα (οι θέσεις στάθμευσης ενός σταθμού έχουν ανώτερο όριο  $Z_{\max}$  της τάξης του 50 με 100).

Ο περιορισμός (17) εξασφαλίζει ότι σε ένα σταθμό  $k$  το χρονικό διάστημα  $t$  θα παραληφθούν όλα τα διαθέσιμα ποδήλατα, αν υπάρχει ανικανοποίητη «Ζήτηση για Παραλαβή». Συγκεκριμένα, έστω ότι η εν λόγω ζήτηση είναι 10 και τα διαθέσιμα ποδήλατα είναι 7 ( $\text{UDBinF}_{kt} = 1$ ). Τότε ο περιορισμός αυτός γίνεται  $7 - 0 \leq BF_{kt} \leq 7 + 0 \Rightarrow BF_{kt} = 7$  ποδήλατα. Δηλαδή, ο σταθμός διέθετε 7 ποδήλατα και ήρθαν 10 πελάτες, οι οποίοι πήραν τα 7 ποδήλατα και 3 από αυτούς δεν ικανοποιήθηκαν. Όταν η «Ζήτηση για Παραλαβή» είναι 5 και τα διαθέσιμα ποδήλατα είναι 7 ( $\text{UDBinF}_{kt} = 0$ ), ο περιορισμός γίνεται χαλαρός και δε δεσμεύει την τιμή της μεταβλητής  $BF_{kt}$ . Δηλαδή, ο περιορισμός γίνεται:  $7 - 1000 \leq BF_{kt} \leq 7 + 1000 \Rightarrow -993 \leq BF_{kt} \leq 1007$  που ισχύει πάντοτε.



Οι περιορισμοί (18) και (19) έχουν αντίστοιχη μαθηματική διατύπωση με τους (16) και (17) για τη «Ζήτηση για Απόθεση» και τη μεταβλητή  $BE_{kt}$ .

### 3.3 Επίλογος

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκε το νέο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για το πρόβλημα του σχεδιασμού ενός Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων. Αρχικά, έγινε μια περιγραφή του εν λόγω προβλήματος, όπως αυτό προσεγγίστηκε από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν οι δείκτες, τα δεδομένα και οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος, παράλληλα με μια διεξοδικότερη ανάλυση της θεώρησης που έγινε στο μοντέλο για το υπόψη πρόβλημα. Ακολούθως, έγινε η εξήγηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Τέλος, παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν οι μαθηματικοί περιορισμοί του μοντέλου και έγινε μια εκτενέστερη επεξήγηση της μαθηματικής διατύπωσης ορισμένων από αυτούς.



## 4 Εφαρμογή μοντέλου σε Αθήνα και Βόλο

### 4.1 Περιγραφή Κώδικα

Για τη μεταφορά του μοντέλου, που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, στον υπολογιστή αναπτύχθηκε κώδικας, στον οποίο ενσωματώθηκαν όλες οι παράμετροι, οι μεταβλητές, οι περιορισμούς και η αντικειμενική συνάρτηση. Ο κώδικας συντάχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού C++. Η συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού είναι αντικειμενοστραφής και είναι συνδυασμός των ευρέως χρησιμοποιούμενων γλωσσών C και Java.

Το μαθηματικό μοντέλο επιλύεται με τη χρήση του IBM CPLEX Optimization Studio Academic Research Edition 12.5. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων γραμμικού και ακέραιου προγραμματισμού. Το όνομα CPLEX προέρχεται από την καινοτομία του λογισμικού αυτού που αφορά στην ενσωμάτωση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης Simplex σε προγραμματιστικό περιβάλλον της γλώσσας C. Τέλος, το προγραμματιστικό περιβάλλον ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του προγράμματος είναι το Microsoft Visual Studio 2008.

Η γλώσσα προγραμματισμού C++ σε συνδυασμό με το πακέτο βελτιστοποίησης της IBM παρέχουν στο χρήστη τη δυνατότητα αποτελεσματικής υλοποίησης κάθε είδους βελτιστοποίησης. Στον κώδικα χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη της CPLEX προκειμένου για τη χρήση των αντικειμένων των κλάσεων της. Έτσι, για τους περιορισμούς του μαθηματικού μοντέλου χρησιμοποιούνται αντικείμενα των κλάσεων «IloRangeArray» ή «IloRangeMatrix», ανάλογα με τις διαστάσεις του κάθε περιορισμού. Για τον ορισμό των μεταβλητών απόφασης του μοντέλου χρησιμοποιούνται αντικείμενα της κλάσης «IloNumVarArray» ή «IloNumVarMatrix» για μονοδιάστατους ή πολυδιάστατους πίνακες αριθμητικών μεταβλητών απόφασης. Αρχικά, δηλαδή, δηλώνονται και αρχικοποιούνται οι παράμετροι του μαθηματικού μοντέλου. Στη συνέχεια, δηλώνονται οι μεταβλητές απόφασης, οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση. Τέλος, ορίζεται στο σύστημα ο τύπος της βελτιστοποίησης (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) και με τη χρήση της εντολής «cplex.solve» επιλύεται το πρόβλημα με το υπολογιστικό πακέτο της IBM.

Ωστόσο, ο μεγάλος όγκος των δεδομένων και των αποτελεσμάτων του εκάστοτε προβλήματος και η ανάγκη εύκολης ανάγνωσής τους οδήγησε στην ανάγκη χρήσης του Microsoft Office Excel για την προβολή τους. Συνεπώς, ήταν απαραίτητη η μεταφορά των δεδομένων από το Excel σε αρχείο .txt για τη μετέπειτα εισαγωγή τους στον κώδικα της C++, καθώς και η μεταφορά των αποτελεσμάτων από τα αρχεία .txt στο Excel. Για να επιτυγχάνεται απρόσκοπτα και σωστά αυτή η μεταφορά στοιχείων από και προς τον κώδικα της C++, αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα

προγραμματισμού Visual Basic, η οποία είναι η γλώσσα που χρησιμοποιεί το Microsoft Office. Με αυτόν τον τρόπο αυτοματοποιήθηκε η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων και εξαγωγής αποτελεσμάτων, γεγονός που διευκολύνει την εκτέλεση πολλών παραδειγμάτων με διαφορετικές παραμέτρους και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

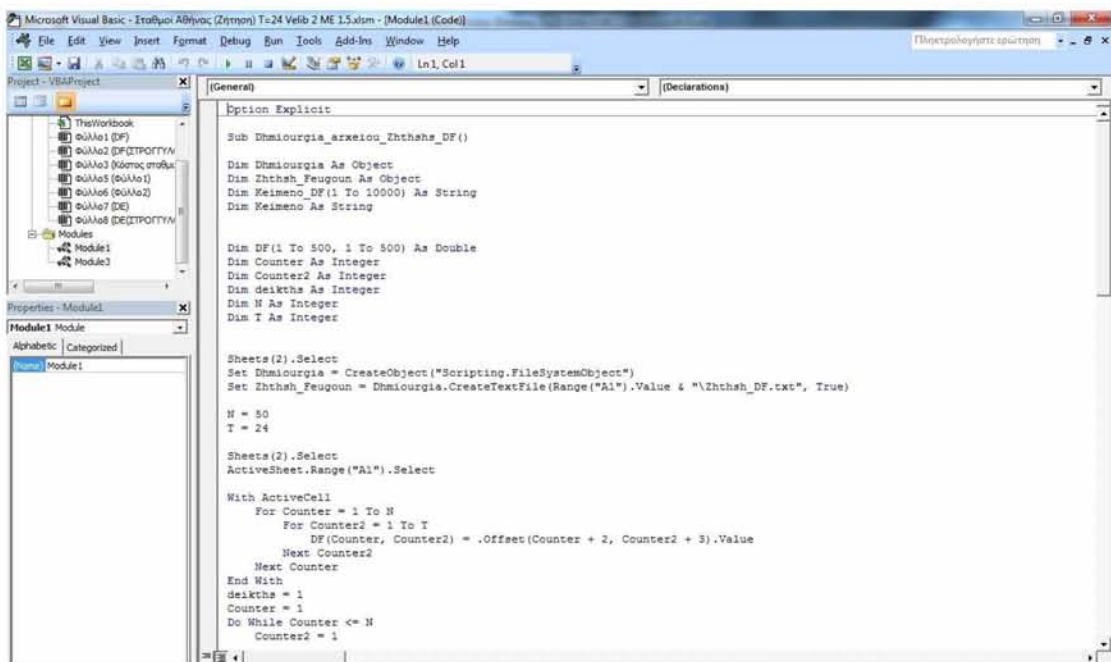
Στην Εικόνα 4-1 απεικονίζονται τμήμα του αρχείου Microsoft Office Excel, το οποίο δημιουργήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων του προβλήματος στο κέντρο της Αθήνας. Η συγκεκριμένη εικόνα απεικονίζει τη «Ζήτηση για Παραλαβή» ποδηλάτων από κάθε υποψήφια τοποθεσία σε κάθε ώρα της ημέρας. Κάθετα απεικονίζονται οι υποψήφιες τοποθεσίες και οριζόντια τα χρονικά διαστήματα στη διάρκεια της ημέρας. Κάτω δεξιά διακρίνεται το κουμπί ελέγχου για την εκτέλεση του κώδικα Visual Basic, με τον οποίο τα εικονιζόμενα δεδομένα εξάγονται σε αρχείο .txt σε μορφή κατάλληλη για την απευθείας εισαγωγή τους στον κώδικα C++.

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'Σταθμοί Αθήνας (Ζήτηση) T=24 Velib 2 ME 1.5 - Microsoft Excel'. The spreadsheet contains a table with columns for time intervals (4-5 to 3-4) and rows for various locations. A button labeled 'Δημιουργία αρχείου Zhtsh\_DF.txt' is visible in the bottom right corner of the spreadsheet area.

	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
2	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	24-1	1-2	2-3	3-4
3																								
4	Αγ. Παύλος	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	Λαγάλια Κολοκοτρώνη	0	0	0	0	2	1	1	1	2	2	2	2	3	5	4	2	1	1	1	0	0	0	0
6	Αέρηδες	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0
7	Ακαδημίας	0	0	0	1	3	2	2	2	3	3	3	3	5	7	6	3	2	1	1	1	0	0	0
8	Ακρόπολη	0	0	0	2	7	5	2	2	2	2	2	3	4	7	5	3	1	1	1	1	0	0	0
9	ΑΣΟΕΕ	0	0	0	1	3	2	2	2	3	3	3	3	5	7	6	3	2	1	1	1	0	0	0
10	Αχαρνών-Ιουλιανού	0	0	0	1	3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	0	0	0	0	0
11	Αχαρνών-Μάρνη	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0
12	Βεΐκου	0	0	0	2	5	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0
13	Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0
14	Ευαγγελισμός	0	0	0	2	7	5	2	2	2	2	2	3	4	7	5	3	1	1	1	1	0	0	0
15	Ηρώδειο	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0
16	Θηρείο	0	0	0	2	7	5	2	2	2	2	2	3	4	7	5	3	1	1	1	1	0	0	0
17	Θηρείο Καφέ	0	0	0	0	2	2	1	1	1	2	2	2	2	3	3	2	1	2	1	1	1	0	0
18	Ιπποκράτους	0	0	0	2	5	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0
19	Κυδαθηναίων	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0
20	Λόφος Στρέφη	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
21	Μαρσέλιος	0	0	0	2	5	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0
22	Μέγαρο Μουσικής	0	0	0	2	7	5	2	2	2	2	2	3	4	7	5	3	1	1	1	1	0	0	0
23	Μεταξουργείο	0	0	1	3	9	6	2	2	3	3	2	2	3	5	8	6							
24	Μικαλακοπούλου	0	0	1	3	6	3	1	1	1	1	1	1	2	3	3								
25	Μοναστηράκι	0	0	1	3	10	7	2	2	3	3	3	3	4	6	9	7							
26	Ομόνοια	0	0	1	3	10	7	2	2	3	3	3	3	4	6	9	7							
27	Παναγιά Καπνικαρέα	0	0	0	1	2	3	2	2	2	2	2	3	4	5	5								
28	Πανεπιστήμιο	0	0	1	3	10	7	2	2	3	3	3	3	4	6	9	7							

**Εικόνα 4-1: Αρχείο Excel για τα δεδομένα «Ζήτησης για Παραλαβή» για το κέντρο της Αθήνας. Κάτω δεξιά διακρίνεται το κουμπί ελέγχου με το οποίο εκτελείται ο κώδικας σε Visual Basic.**

Στην Εικόνα 4-2 απεικονίζεται τμήμα του κώδικα Visual Basic που αναπτύχθηκε. Στη συγκεκριμένη εικόνα απεικονίζεται ο κώδικας για την εξαγωγή των δεδομένων της «Ζήτησης για Παραλαβή» σε αρχείο .txt.



**Εικόνα 4-2: Το περιβάλλον ανάπτυξης του κώδικα Visual Basic και η Ρουτίνα για την εξαγωγή των δεδομένων της «Ζήτησης για Παραλαβή» σε αρχείο .txt**

Στην Εικόνα 4-3 απεικονίζονται τα δεδομένα της «Ζήτησης για Παραλαβή» σε κατάλληλη μορφή για απευθείας εισαγωγή τους στον κώδικα C++.

Αρχείο	Επιλογή	Μορφή	Προβολή	Βοήθεια
DF 0	0	0	0	0
DF 1	0	0	0	0
DF 2	0	0	0	0
DF 3	0	0	0	0
DF 4	0	0	0	0
DF 5	0	0	0	0
DF 6	0	0	0	0
DF 7	0	0	0	0
DF 8	0	0	0	0
DF 9	0	0	0	0
DF 10	0	0	0	0
DF 11	0	0	0	0
DF 12	0	0	0	0
DF 13	0	0	0	0
DF 14	0	0	0	0
DF 15	0	0	0	0
DF 16	0	0	0	0
DF 17	0	0	0	0
DF 18	0	0	0	0
DF 19	0	0	0	0
DF 20	0	0	0	0
DF 21	0	0	0	0
DF 22	0	0	0	0
DF 23	0	0	0	0
DF 24	0	0	0	0
DF 25	0	0	0	0
DF 26	0	0	0	0
DF 27	0	0	0	0
DF 28	0	0	0	0
DF 29	0	0	0	0
DF 30	0	0	0	0
DF 31	0	0	0	0
DF 32	0	0	0	0
DF 33	0	0	0	0
DF 34	0	0	0	0
DF 35	0	0	0	0
DF 36	0	0	0	0
DF 37	0	0	0	0
DF 38	0	0	0	0
DF 39	0	0	0	0
DF 40	0	0	0	0
DF 41	0	0	0	0
DF 42	0	0	0	0
DF 43	0	0	0	0
DF 44	0	0	0	0
DF 45	0	0	0	0
DF 46	0	0	0	0
DF 47	0	0	0	0
DF 48	0	0	0	0
DF 49	0	0	0	0

**Εικόνα 4-3: Αρχείο .txt με τα δεδομένα της «Ζήτησης για Παραλαβή» σε μορφή κατάλληλη για εισαγωγή στον κώδικα C++**

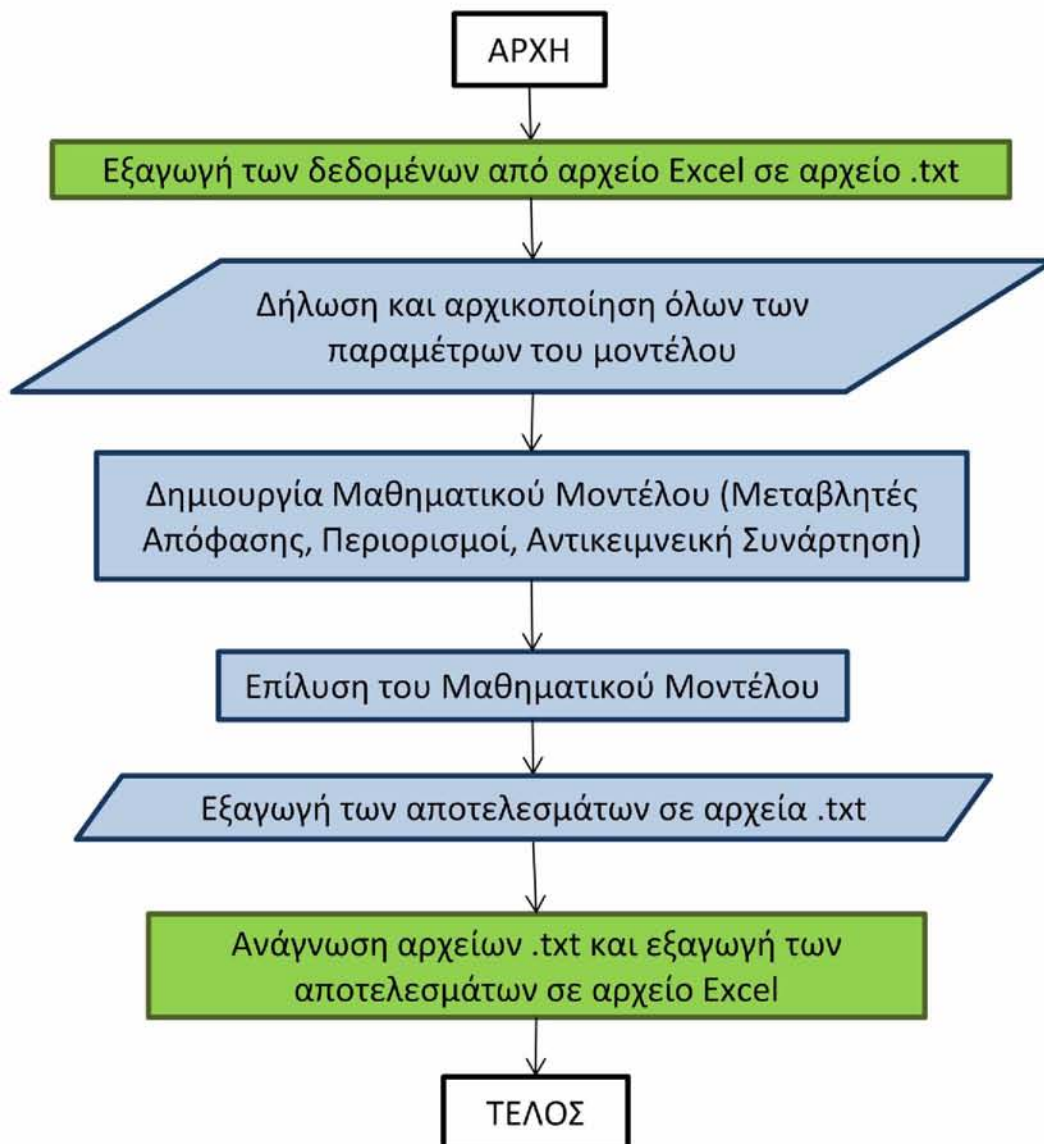


Εκτός από τα δεδομένα του εκάστοτε προβλήματος, δημιουργήθηκε κώδικας Visual Basic και για τα αποτελέσματα. Ο εν λόγω κώδικας εκτελείται για την ανάγνωση των αρχείων .txt με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον κώδικα C++ και τα καταχωρεί σε αρχείο Excel. Το αρχείο αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 4-4, όπου διακρίνεται το κουμπί ελέγχου για την εκτέλεση του κώδικα («Αποτελέσματα Μεταβλητών»). Ο κώδικας εκτελείται και σε κάθε καρτέλα του αρχείου καταχωρεί τις τιμές της αντίστοιχης μεταβλητής του μοντέλου. Με τον τρόπο αυτό είναι ευκολότερη η προβολή και η διαχείριση των αποτελεσμάτων του εκάστοτε προβλήματος και υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης με παλιότερα αποτελέσματα, καθώς και η δημιουργία διαγραμμάτων.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	C:\Αποτελεσματα_Kwdika	DNK	Συντελεστής Ζήτησης								
2	Αγ. Παύλος	0	0.25								
3	Λιγαλμα Κολοκοτρώνη	9	1								
4	Αέρηδες	0	0.75								
5	Ακαδημίας	13	1.5								
6	Ακρόπολη	14	1.25								
7	ΑΣΟΕΕ	13	1.5								
8	Αχαρνών-Ιουλιανού	8	0.5								
9	Αχαρνών-Μάρνη	0	0.5								
10	Βείκου	12	0.75								
11	Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο	8	0.5								
12	Ευαγγελισμός	9	1.25								
13	Ηρώδειο	8	0.5								
14	Θησείο	15	1.25								
15	Θησείο Καφέ	8	1								
16	Ιπποκράτους	8	0.75								
17	Κυδαθηναίων	0	0.5								
18	Λόφος Στρέφη	0	0.25								
19	Μαράσλειος	11	0.75								
20	Μέγαρο Μουσικής	13	1.25								
21	Μεταξουργείο	19	1.5								
22	Μιχαλακοπούλου	8	1								
23	Μοναστηράκι	22	1.75								
24	Ομόνοια	13	1.75								
25	Παναγιά Καπνικαρέα	8	1.5								
26	Πανεπιστήμιο	19	1.75								
27	Περίστερι	11	1.25								

**Εικόνα 4-4: Αρχείο Excel με τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου. Δεξιά διακρίνεται το κουμπί ελέγχου για την ανάγνωση των αρχείων .txt που προκύπτουν από τον κώδικα C++.**

Στο Σχήμα 4-1 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής όλης της διαδικασίας που εκτελείται για την επίλυση ενός προβλήματος με τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε. Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται ο κώδικας σε Visual Basic για τη μεταφορά των δεδομένων από το αρχείο Excel σε αρχείο .txt και τη μεταφορά των αποτελεσμάτων από το αρχείο .txt στο αρχείο Excel. Με μπλε απεικονίζεται ο κώδικας σε C++ για τη δημιουργία και επίλυση του μαθηματικού μοντέλου.



Σχήμα 4-1: Διάγραμμα Ροής για τους κώδικες όλης της διαδικασίας (πράσινο: Visual Basic, μπλε: C++)

## 4.2 Προέλευση Δεδομένων Ζήτησης

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε σε δύο πόλεις, οι οποίες δε διαθέτουν Δίκτυο Κοινόχρηστων Ποδηλάτων. Αυτές είναι η Αθήνα και ο Βόλος, για καθεμιά από τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τιμές δεδομένων. Ωστόσο, η μέθοδος υπολογισμού των τιμών αυτών είναι η ίδια και για τις δύο εφαρμογές του μοντέλου.

Προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός Δίκτυο Κοινόχρηστων Ποδηλάτων για την Αθήνα και ενός δικτύου για τον Βόλο είναι αναγκαία η εκτίμηση της ενδεχόμενης ζήτησης του καθενός. Σε γενικές γραμμές, θα πρέπει να σημειωθεί

ότι ο στόχος αυτής της έρευνας είναι η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου για το σχεδιασμό ενός ΔΚΠ και όχι η εκτίμηση της ζήτησης που αυτό θα έχει μετά την εγκατάστασή του.

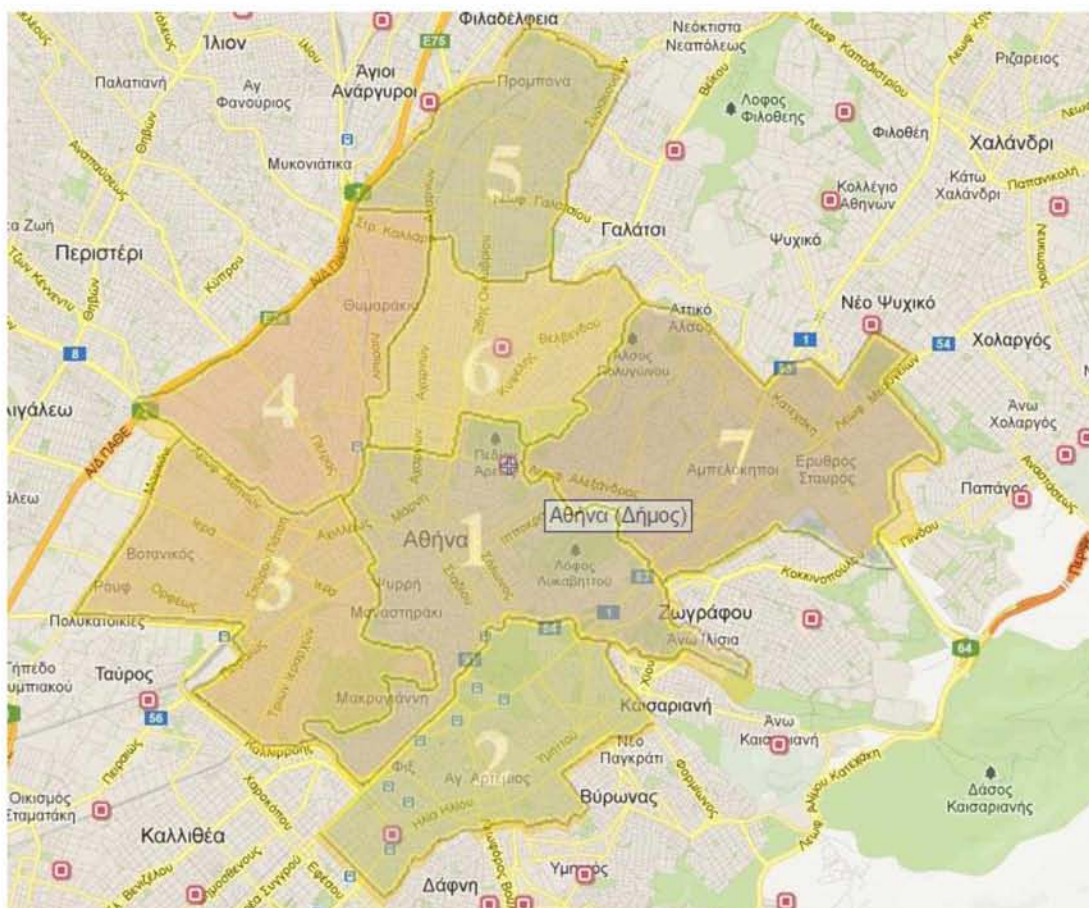
Ωστόσο, προκειμένου να εκτιμηθεί η ζήτηση ενός μελλοντικού ΔΚΠ για τις δύο πόλεις, έτσι ώστε τα δεδομένα που θα εισαχθούν στο μοντέλο να είναι ρεαλιστικά, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν ως βάση τα δεδομένα χρήσης ήδη εγκατεστημένων ΔΚΠ σε άλλες ευρωπαϊκές πόλεις. Για το λόγο αυτό, λήφθηκαν υπόψη τρεις δημοσιεύσεις, οι οποίες προσεγγίζουν η καθεμία με διαφορετικό τρόπο τη χρήση των ποδηλάτων σε υφιστάμενα ΔΚΠ σε άλλες πόλεις. Συγκεκριμένα, οι Froehlich et al. (2009) (15), πραγματοποιούν μια χωροχρονική ανάλυση της χρήσης των σταθμών ποδηλάτων στο ΔΚΠ της Βαρκελώνης, το λεγόμενο “*Bicing*”. Οι Lathia et al. (2012) (16) αναλύουν τα δεδομένα χρήσης του δικτύου “*Barclay Cycle Hire*” στην πόλη του Λονδίνου. Τέλος, οι Etienne et al. (2012) (17) προτείνουν ένα μοντέλο για το σχηματισμό ομάδων (clusters) των σταθμών του ΔΚΠ “*Velib*” του Παρισιού με βάση τα δεδομένα της χρήσης του.

Και οι τρεις εργασίες περιέχουν δεδομένα χρήσης ήδη κατασκευασμένων δικτύων σε τρεις ευρωπαϊκές πόλεις, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της ζήτησης ενός τέτοιου δικτύου που πρόκειται να κατασκευαστεί στις δύο πόλεις. Η μελέτη για το ΔΚΠ “*Velib*” του Παρισιού περιγράφει τη δυναμική των σταθμών με ένα σημαντικά σαφέστερο τρόπο από εκείνο που χρησιμοποιείται στις δύο άλλες μελέτες, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τις αφίξεις και τις αναχωρήσεις από τους αυτούς. Το γεγονός αυτό καθιστά τα δεδομένα της εν λόγω μελέτης ιδανικά για την κατασκευή των τιμών των παραμέτρων  $\overline{DF}_{it}$  και  $\overline{DE}_{it}$ . Έτσι λοιπόν, έγινε ανάλυση των δεδομένων χρήσης του ΔΚΠ “*Velib*” του Παρισιού, προκειμένου να καθοριστεί η εκτιμώμενη ζήτηση για την Αθήνα και τον Βόλο. Είναι, επίσης, απαραίτητο να αναφερθεί ότι τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται αντιστοιχούν στο μέσο όρο της ζήτησης ενός μήνα στο Παρίσι (Απρίλιος 2011).

### 4.3 Αθήνα

Η Αθήνα είναι η μεγαλύτερη πόλη και πρωτεύουσα της Ελλάδας και είναι η έδρα της Περιφέρειας Αττικής. Ο δήμος Αθηναίων έχει πληθυσμό 664.046 κατοίκους με έκταση περίπου 36km<sup>2</sup> και χωρίζεται σε επτά δημοτικές ενότητες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-5. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία το μαθηματικό μοντέλο εφαρμόστηκε στο 1ο δημοτικό διαμέρισμα, το οποίο αποτελεί το κέντρο του Δήμου και έχει πληθυσμό 100.936 κατοίκους και έκταση περίπου 6,8 km<sup>2</sup>.





Εικόνα 4-5: Χάρτης της Αθήνας, στον οποίο εμφανίζονται τα 7 δημοτικά διαμερίσματα

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η ζήτηση προέρχεται από τη μελέτη του ΔΚΠ “Velib” του Παρισιού, του οποίου τα δεδομένα προσαρμόστηκαν για την πόλη της Αθήνας. Η εργασία για το ΔΚΠ “Velib” (17) κατηγοριοποιεί τους πάνω από 1200 σταθμούς του Παρισιού σε οκτώ διαφορετικές ομάδες (clusters) σταθμών ποδηλάτων ανάλογα με το είδος της δραστηριότητας που πραγματοποιείται σε καθέναν από αυτούς. Αυτά τα 8 clusters είναι τα εξής:

1. Spare Time 1
2. Spare Time 2
3. Housing
4. Employment 1
5. Employment 2
6. Mixed
7. Railway Stations
8. Parks

Αυτές οι ομάδες (clusters) προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων χρήσης κάθε σταθμού κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι, για παράδειγμα, αν ένας σταθμός έχει συγκεκριμένη δραστηριότητα με υψηλή «Ζήτηση για Παραλαβή» τις πρωινές ώρες, όταν οι πολίτες παραλαμβάνουν ποδήλατο από το σπίτι στη δουλειά,

και υψηλή «Ζήτηση για Απόθεση» το απόγευμα, όταν οι πολίτες επιστρέφουν σπίτι, τότε ο σταθμός αυτός κατατάσσεται στην ομάδα “Housing”. Τέλος, για κάθε ομάδα προκύπτουν συγκεκριμένες μέσες τιμές για κάθε ζήτηση.

Ωστόσο, στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία το Δίκτυο Κοινόχρηστων Ποδηλάτων δεν έχει εγκατασταθεί ακόμα. Έτσι, δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα και η ζήτηση κάθε τοποθεσίας χρειάζεται να προβλεφθεί. Ανάλογα με το περιβάλλον της κάθε τοποθεσίας (υψηλή πυκνότητα πληθυσμού ή πυκνότητα εργασίας ή δίπλα στους σταθμούς του μετρό), κατατάσσεται σε μια ομάδα (cluster), η οποία έχει ένα συγκεκριμένο μέσο προφίλ ζήτησης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Από τα υπάρχοντα δεδομένα για τη ζήτηση της Αθήνας δεν υπάρχει η ανάγκη για την ύπαρξη clusters με τα ίδια στοιχεία. Για παράδειγμα, δε χρειάζεται να υπάρχουν δύο διαφορετικά clusters για να περιγράψουν τις περιοχές με χαρακτηριστικό στοιχείο την «Employment» (Απασχόληση). Αυτό συμβαίνει διότι το 1<sup>ο</sup> δημοτικό διαμέρισμα της Αθήνας έχει πολύ λιγότερο πληθυσμό και μικρότερη έκταση από αυτή του Παρισιού. Συνεπώς η δραστηριότητα που εμφανίζεται στους διάφορους τομείς είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του Παρισιού, το οποίο έχει πληθυσμό 2.193.031 και έκταση περίπου 105 km<sup>2</sup>. Για τη μικρή περιοχή του 1<sup>ου</sup> Δημοτικού Διαμερίσματος του Δήμου Αθηναίων και με στόχο να καταστούν λιγότερο περίπλοκα τα δεδομένα της ζήτησης, χωρίς να μειωθεί η εγκυρότητα, επιλέχθηκαν τέσσερις από τις προαναφερθείσες ομάδες (clusters), προκειμένου να κατηγοριοποιηθούν οι υποψήφιες τοποθεσίες του μαθηματικού μοντέλου. Τα τέσσερα αυτά clusters που επιλέχθηκαν είναι τα εξής:

1. Housing
2. Employment
3. Subway
4. Spare Time

Το cluster “Housing” περιέχει τις υποψήφιες τοποθεσίες που βρίσκονται κοντά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Παρατηρείται μία ασυμμετρία στο προφίλ των ζητήσεων με μεγάλη «Ζήτηση για Παραλαβή» και μικρή «Ζήτηση για Απόθεση» κατά τη διάρκεια του πρωινού peak, ενώ κατά τη διάρκεια του απογευματινού peak το αντίστροφο. Το cluster “Employment” παρουσιάζει μία ασυμμετρία σε αντίθεση με αυτό του “Housing”. Το τρίτο cluster, “Subway”, αντιστοιχεί στις υποψήφιες τοποθεσίες κοντά σε σταθμούς του μετρό. Αυτό το cluster έχει τη μέγιστη συνολική ζήτηση κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας, το οποίο είναι ενδεικτικό της υψηλής δραστηριότητας των σταθμών του μετρό. Τέλος, το cluster “Spare Time” περιλαμβάνει όλες εκείνες τις τοποθεσίες, οι οποίες βρίσκονται κοντά σε εστιατόρια, καφέ, μπαρ, καταστήματα κλπ.

Τα προφίλ της ζήτησης προέκυψαν από το μέσο όρο των δεδομένων χρήσης του ΔΚΠ “Velib” στο σύνολο της έκτασης του Παρισιού. Το παράδειγμα της παρούσας ενότητας περιορίζεται μόνο στο 1<sup>ο</sup> Δημοτικό Διαμέρισμα του Δήμου Αθηναίων. Η σύγκριση μεταξύ της πυκνότητας του πληθυσμού του Παρισιού (21000κάτοικοι/km<sup>2</sup>) (18) και του 1ου Δημοτικού Διαμερίσματος του Δήμου

Αθηναίων (16830 κάτοικοι/km<sup>2</sup>) (19) δείχνει ότι οι δύο περιοχές έχουν διαφορετική πυκνότητα πληθυσμού και έτσι η Αθήνα θα έχει μειωμένη αναμενόμενη χρήση του δικτύου ενοικίασης ποδηλάτων. Δηλαδή, ο συντελεστής της ζήτησης για το 1<sup>ο</sup> Δημοτικό Διαμέρισμα του Δήμου Αθηναίων είναι 0,8, όσον αφορά το κριτήριο της πυκνότητας πληθυσμού.

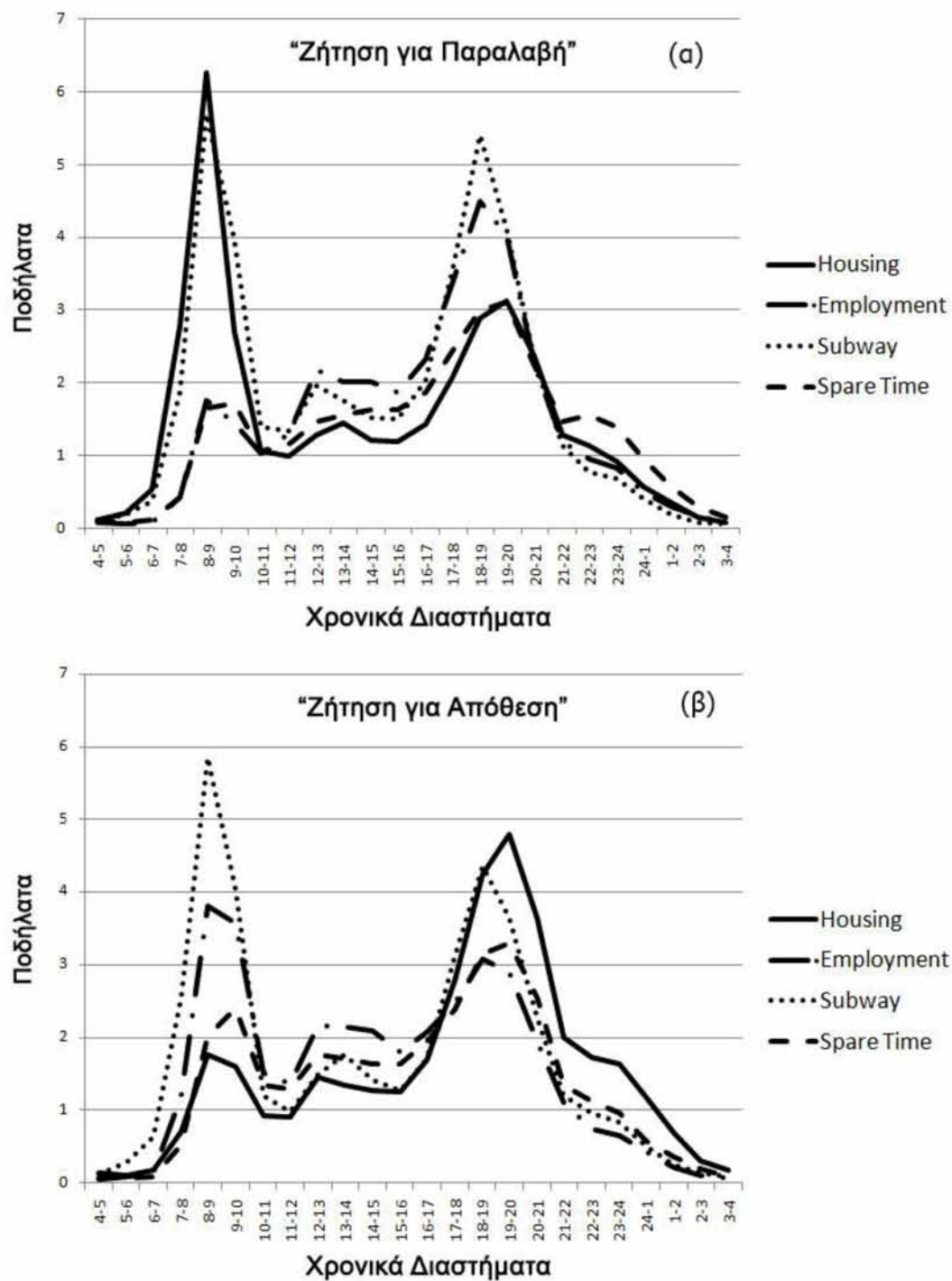
Ωστόσο, εκτός από την πυκνότητα του πληθυσμού, λήφθηκε υπόψη η απόσταση των σταθμών από το κέντρο του Δήμου, προκειμένου να προβλεφθεί η ζήτηση. Στην προαναφερθείσα εργασία του Παρισιού για το ΔΚΠ “*Velib*” (17) επισημαίνεται ότι η μέση δραστηριότητα ενός σταθμού είναι μεγαλύτερη αν βρίσκεται κοντά στο κέντρο του Παρισιού απ’ ό,τι στα περίχωρα. Η απόσταση των σταθμών του ΔΚΠ “*Velib*” από το κέντρο της πόλης (“*Les Halles*”) είναι από 0,1 έως 10 χλμ. Οι επιλεγμένες υποψήφιες θέσεις στην παρούσα εργασία απέχουν από το κέντρο του Δήμου («Σύνταγμα») από 0,35 έως 3,1 χλμ. Αυτό σημαίνει ότι οι σταθμοί της Αθήνας σε σχέση με αυτούς του Παρισιού είναι πιο κοντά στο κέντρο. Γι’ αυτό είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι η μέση ζήτηση ενός μελλοντικού ΔΚΠ στο κέντρο της Αθήνας είναι περίπου ίση με 2 φορές τη μέση τιμή της χρήσης κοινόχρηστων ποδηλάτων σε όλη την πόλη του Παρισιού.

Το Σχήμα 4-2 απεικονίζει τα προφίλ της αναμενόμενης ζήτησης των επιλεγμένων τεσσάρων clusters κατά τη διάρκεια μιας μέσης ημέρας στην Αθήνα, όπως αυτά διαμορφώθηκαν μετά τον πολλαπλασιασμό των αντίστοιχων δεδομένων χρήσης του “*Velib*” με τους παραπάνω συντελεστές  $0,8 \times 2 = 1,6$ .

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, το μαθηματικό μοντέλο χρειάζεται ένα προκαθορισμένο σύνολο υποψήφιων τοποθεσιών. Έτσι, στη συγκεκριμένη εφαρμογή του μοντέλου επιλέχθηκαν στο 1<sup>ο</sup> Δημοτικό Διαμέρισμα του Δήμου Αθηναίων 50 υποψήφιες τοποθεσίες όπου θα μπορούσε να κατασκευαστούν σταθμοί κοινόχρηστων ποδηλάτων, λαμβάνοντας υπόψη σημαντικά αστικά στοιχεία, όπως η πυκνότητα του πληθυσμού, η πυκνότητα εργασιών, οι σταθμοί του μετρό και οι πλατείες. Αυτές οι 50 τοποθεσίες ταξινομήθηκαν στα προαναφερθέντα 4 clusters.

Επιπλέον, η συνολική ζήτηση δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε κάθε υποψήφια τοποθεσία, αλλά εξαρτάται από την απόστασή του από το κέντρο της πόλης και από την ένταση της δραστηριότητας που υπάρχει στην περιοχή που καλύπτει αντίστοιχα ο καθένας από αυτούς. Έτσι, η ζήτηση του κάθε τοποθεσίας πολλαπλασιάζεται με διαφορετικό συντελεστή κλιμάκωσης, ο οποίος είναι ανάμεσα σε 0,25 (απεικονίζει μια τοποθεσία χαμηλής δραστηριότητας) έως 2 (απεικονίζει μια τοποθεσία υψηλής δραστηριότητας). Η μέση τιμή αυτών των συντελεστών είναι 1.

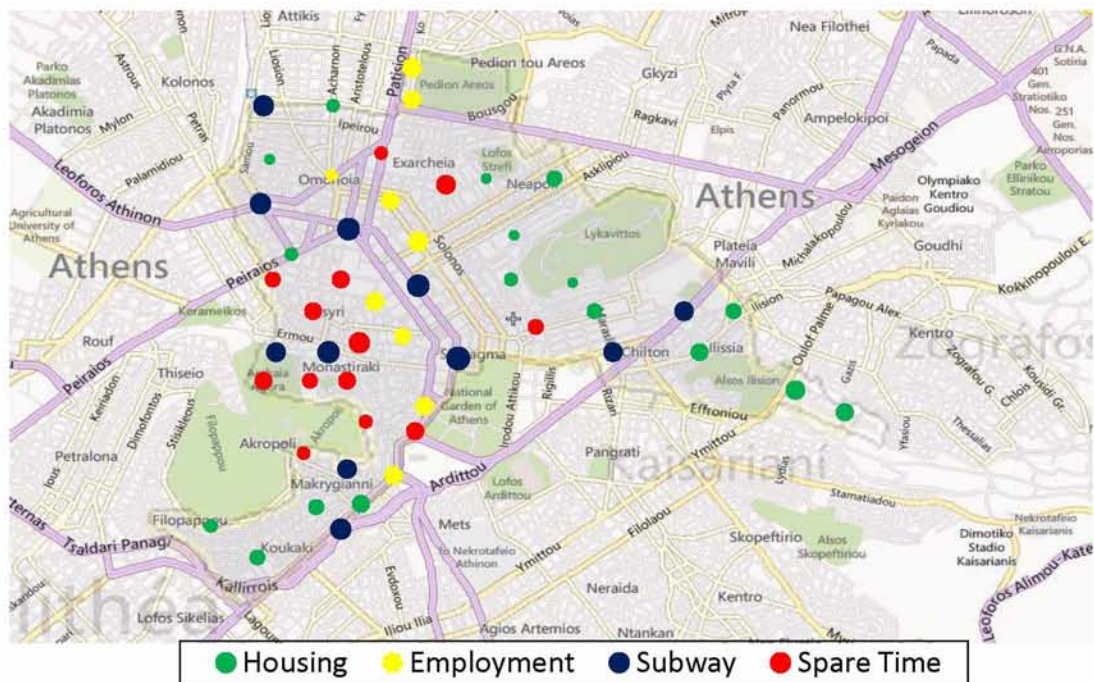
Σε καθεμιά, λοιπόν, από τις 50 υποψήφιες τοποθεσίες δόθηκε ένας συντελεστής ζήτησης από 0,25 έως 2, σύμφωνα με τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αυτές οι υποψήφιες θέσεις φαίνονται στην Εικόνα 4-6. Το χρώμα κάθε κουκκίδας δηλώνει το cluster, όπου ανήκει η συγκεκριμένη τοποθεσία και το μέγεθός της είναι ανάλογο του εξειδικευμένου συντελεστή ζήτησης που της έχει δοθεί.



**Σχήμα 4-2: α) Η ωριαία "Ζήτηση για Παραλαβή" κάθε cluster κατά τη διάρκεια μίας ημέρας στην Αθήνα**

**β) Η ωριαία "Ζήτηση για Απόθεση" κάθε cluster κατά τη διάρκεια μίας ημέρας στην Αθήνα**





**Εικόνα 4-6: Οι υποψήφιοι σταθμοί ανάλογα με το cluster στο οποίο ανήκουν και το συντελεστή που τους προσδιορίζει.**

Όσον αφορά τα δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο πλην της ζήτησης, ο χρόνος περπατήματος  $\overline{APE}_{ik}$  μεταξύ των υποψήφιων τοποθεσιών χρησιμοποιώντας το Google Earth. Ο χρόνος περπατήματος προκύπτει διαιρώντας την πραγματική απόσταση μεταξύ των υποψήφιων τοποθεσιών με τη μέση ταχύτητα περπατήματος, η οποία έχει θεωρηθεί ότι είναι 4χμ/ώρα. Ως πραγματική απόσταση εννοείται η μικρότερη απόσταση μιας τοποθεσίας από μια άλλη ακολουθώντας τους δρόμους της πόλης ως πεζός. Έτσι, σε καμία περίπτωση δεν υπονοείται η απόσταση σε ευθεία γραμμή στο χάρτη ούτε, όμως, λαμβάνονται υπόψη μονοδρομήσεις που μπορεί να τροποποιήσουν την απόσταση, όταν αυτή καλύπτεται από όχημα.

Όσον αφορά τα διάφορα κόστη του δικτύου, λήφθηκαν υπόψη δύο ήδη εγκατεστημένα ΔΚΠ, το πρώτο είναι στην πόλη της Καρδίτσας και το δεύτερο στην πόλη της Λευκωσίας. Εξετάζοντας τον προϋπολογισμό και τις διαστάσεις της κάθε πόλης και του δικτύου της, προέκυψαν τα δεδομένα του Πίνακα 4-1 για την περίπτωση της Αθήνας. Ο διαθέσιμος προϋπολογισμός θεωρήθηκε €1.000.000.

**Πίνακας 4-1: Κόστη εγκατάστασης ενός ΔΚΠ**

Κόστος εγκατάστασης ενός σταθμού ποδηλάτων	$\overline{CS}$	€ 12.000
Κόστος κατασκευής μίας θέσης στάθμευσης	$\overline{CTH}$	€ 900
Κόστος αγοράς ενός ποδηλάτου	$\overline{CB}$	€ 500

Επίσης, η τιμή της παραμέτρου  $\overline{\max_{\text{per}}}$  θεωρείται ίση με 7 λεπτά. Αυτό σημαίνει ότι μια τοποθεσία, χωρίς εγκατεστημένο σταθμό δεν μπορεί να απέχει από έναν εγκατεστημένο σταθμό περισσότερο από 7 λεπτά με τα πόδια.

Ακόμη, ο ελάχιστος ( $\overline{Z_{\min}}$ ) και ο μέγιστος ( $\overline{Z_{\max}}$ ) αριθμός θέσεων στάθμευσης ποδηλάτων ενός σταθμού θεωρούνται ίσοι με αυτούς στο ΔΚΠ “Velib’”, δηλαδή 8 και 70 θέσεις ανά σταθμό αντίστοιχα (17).

Επιπλέον, για κάθε χρήστη του συστήματος, ο οποίος πρέπει να περπατήσει από την τοποθεσία του/της (μη εγκατεστημένο σταθμό) σε έναν εγκατεστημένο σταθμό ορίστηκε το κόστος  $\overline{CDT}$  ως ποινή σε 1 € για κάθε λεπτό που αυτός/αυτή περπατά. Ακόμη το κόστος της αδυναμίας κάλυψης της ζήτησης  $\overline{CDEMAND}$  θεωρήθηκε 30 €, η οποία θα μπορούσε να είναι και η ετήσια συνδρομή ενός πελάτη του δικτύου, ο οποίος τελικά δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί και δε χρησιμοποιεί το δίκτυο. Ο δεύτερος και ο τρίτος όρος στην αντικειμενική συνάρτηση έχουν το ίδιο κόστος, επειδή δεν υπάρχει καμία πρόσθετη σημασία στην ελαχιστοποίηση είτε της «Ζήτησης για Παραλαβή» είτε της «Ζήτησης για Απόθεση». Σε αυτούς τους δύο όρους, οι τιμές  $\overline{DF_{kt}}$  και  $\overline{DE_{kt}}$  θα μπορούσαν να αφαιρεθούν, δεδομένου ότι δεν είναι μεταβλητές, αλλά δεδομένα και δεν επιδέχονται βελτιστοποίηση. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τα  $-BF_{kt}$  και  $-BE_{kt}$ , πράγμα που σημαίνει ότι θέλει να παραληφθούν και να αποτεθούν όσο το δυνατόν περισσότερα ποδήλατα από και προς τους σταθμούς αντίστοιχα, ικανοποιώντας το μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό της ζήτησης.

Τέλος η παράμετρος  $\overline{\text{perde}}$  θεωρείται ότι είναι ένα μέτρο της δημοτικότητας του ποδηλάτου σε μια συγκεκριμένη πόλη. Για παράδειγμα, αν οι πολίτες προτιμούν το ποδήλατο ως μέσο μεταφοράς, θα ήταν πρόθυμοι να περπατήσουν από την τοποθεσία τους στον πλησιέστερο σταθμό, έτσι ώστε να πάρουν ένα ποδήλατο και να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο ( $\overline{\text{perde}} \rightarrow 1$ ). Ωστόσο, εάν το ποδήλατο δεν είναι πολύ δημοφιλές μέσο μεταφοράς στην πόλη, μόνο λίγη μόνο ζήτηση από μια τοποθεσία χωρίς σταθμό θα μεταφερθεί στον πλησιέστερο σταθμό ( $\overline{\text{perde}} \rightarrow 0$ ). Σχετικά με την εν λόγω παράμετρο, επιχειρήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου ως προς αυτή και επιλύθηκαν δύο περιπτώσεις του προβλήματος, όπως θα παρουσιαστεί και στο Κεφάλαιο 5. Στην 1<sup>η</sup> περίπτωση θεωρήθηκε ότι όλοι οι δυνητικοί πελάτες των τοποθεσιών χωρίς σταθμό είναι πρόθυμοι να περπατήσουν προς τον πλησιέστερο σταθμό και να παραλάβουν ή να αποθέσουν ένα ποδήλατο ( $\overline{\text{perde}} = 1$ ). Στη 2<sup>η</sup> περίπτωση θεωρήθηκε ότι μόνο το 50% αυτών θα το έκαναν αυτό ( $\overline{\text{perde}} = 0.5$ ). Οι υπόλοιποι δυνητικοί πελάτες δε θα χρησιμοποιήσουν το δίκτυο.

#### 4.4 Βόλος

Ο Βόλος ανήκει στην Περιφέρεια Θεσσαλίας και είναι πρωτεύουσα του Νομού Μαγνησίας με πληθυσμό 144.420 κατοίκους και έκταση περίπου 387.14km<sup>2</sup>. Χωρίζεται σε εννέα δημοτικές ενότητες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-7. Στην παρούσα εργασία το μαθηματικό μοντέλο εφαρμόστηκε στην 1<sup>η</sup> και την 8<sup>η</sup> δημοτική ενότητα, και πιο συγκεκριμένα στο σύνολο του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου και της Ν. Ιωνίας, με συνολικό πληθυσμό 125.248 κατοίκους και έκταση περίπου 10 km<sup>2</sup>.



Εικόνα 4-7: Χάρτης του Δήμου Βόλου, στον οποίο εμφανίζονται τα 9 δημοτικά διαμερίσματα

Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση του ΔΚΠ για την Αθήνα η ζήτηση προέρχεται από τη μελέτη του ΔΚΠ “Velib’” του Παρισιού, του οποίου τα δεδομένα προσαρμόστηκαν για την Πόλη του Βόλου. Και σε αυτή την περίπτωση, ενώ η εργασία για το ΔΚΠ “Velib’” (17) δημιουργεί οκτώ διαφορετικά clusters ανάλογα με το είδος της δραστηριότητας που πραγματοποιείται σε κάθε περιοχή, στο ΔΚΠ για το Βόλο έχουν επιλεγεί μόνο 2 από αυτά, τα οποία είναι τα εξής:

1. Housing
2. Employment

Όπως και στην περίπτωση του ΔΚΠ για την Αθήνα γίνεται αυτή η θεώρηση, διότι ο Βόλος είναι μια πόλη λιγότερο πυκνοκατοικημένη από το Παρίσι και το



κέντρο της Αθήνας. Επίσης, δε διαθέτει μετρό, ενώ πολλές τοποθεσίες έχουν τόσο το ρόλο της διασκέδασης (“Spare Time”), όσο και το ρόλο της απασχόλησης (“Employment”). Σε αυτές τις περιπτώσεις θεωρήθηκε εντονότερος ο ρόλος της απασχόλησης έναντι της διασκέδασης, διότι η χρήση κοινόχρηστων ποδηλάτων για λόγους αναψυχής είναι περιορισμένη, όπως δηλώνει η πρακτική σε άλλες πόλεις (20). Συνεπώς, δεν υπάρχει η ανάγκη για την ύπαρξη τόσο πολλών clusters.

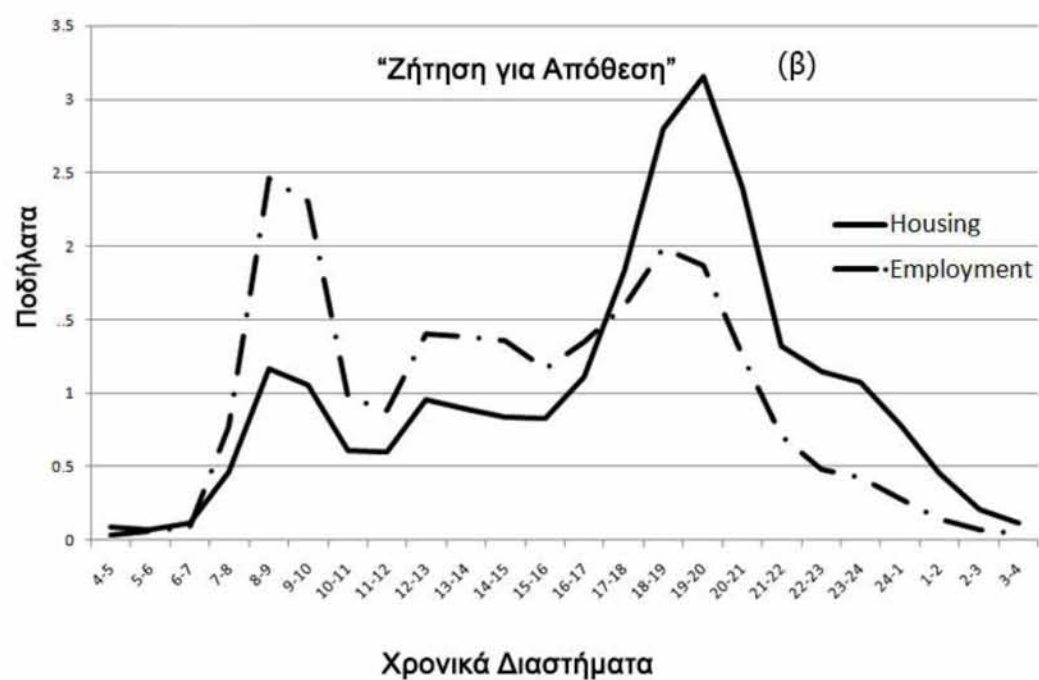
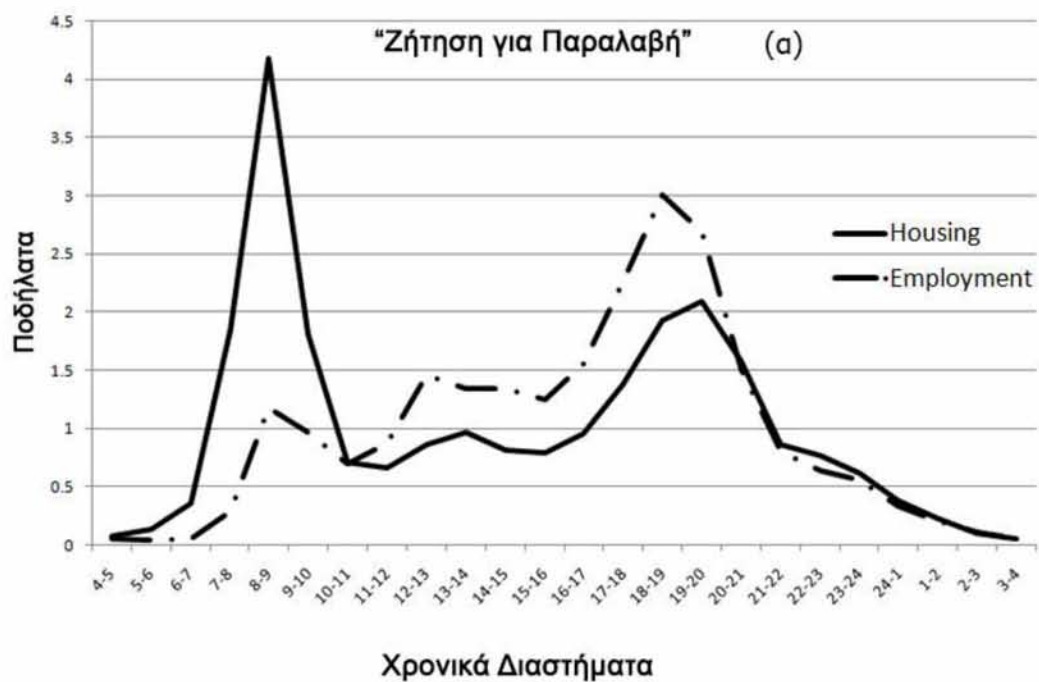
Με την ίδια λογική, το cluster “Housing” περιέχει τις υποψήφιες τοποθεσίες που βρίσκονται κοντά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, καθώς παρατηρείται μία ασυμμετρία στο προφίλ των ζητήσεων με μεγάλη «Ζήτηση για Παραλαβή» και μικρή «Ζήτηση για Απόθεση» κατά τη διάρκεια του πρωινού peak, ενώ κατά τη διάρκεια του απογευματινού peak το αντίστροφο. Επίσης, το cluster “Employment” παρουσιάζει μία ασυμμετρία σε αντίθεση με αυτό του “Housing”.

Η σύγκριση μεταξύ της πυκνότητας του πληθυσμού του Παρισιού ( $21000\text{κάτοικοι}/\text{km}^2$ ) (18) και του πολεοδομικού συγκροτήματος του Βόλου ( $12525\text{κάτοικοι}/\text{km}^2$ ) (19) δείχνει μια αναλογία 0,6, δηλαδή η ζήτηση στο Βόλο αναμένεται να είναι ίση περίπου με τη μισή ζήτηση ποδηλάτων στο “Velib’”, όσον αφορά το κριτήριο της πυκνότητας πληθυσμού.

Ωστόσο, εκτός από την πυκνότητα του πληθυσμού, λήφθηκε κι εδώ υπόψη η απόσταση των σταθμών από το κέντρο του Δήμου, προκειμένου να προβλεφθεί η ζήτηση. Όπως προαναφέρθηκε, η μέση δραστηριότητα ενός σταθμού είναι μεγαλύτερη αν βρίσκεται κοντά στο κέντρο του Παρισιού απ’ ότι στα περίχωρα (17). Οι επιλεγμένες υποψήφιες τοποθεσίες στην παρούσα εργασία απέχουν από το κέντρο του Δήμου, το οποίο θεωρείται ο Άγιος Νικόλαος, από 0,45 έως 3,5χλμ. Αυτό σημαίνει ότι οι σταθμοί της Βόλου σε σχέση με αυτούς του Παρισιού είναι πιο κοντά στο κέντρο. Γι’ αυτό είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι η μέση ζήτηση ενός μελλοντικού ΔΚΠ στο Βόλο θα είναι περίπου ίση με 2 φορές τη μέση τιμή της ζήτησης σε όλη την πόλη του Παρισιού. Για το λόγο αυτό, τα δεδομένα χρήσης του “Velib’” πολλαπλασιάστηκαν με το συντελεστή 2 έτσι ώστε να είναι περισσότερο ρεαλιστικά για το πρόβλημά μας.

Το Σχήμα 4-3 απεικονίζει τα προφίλ της αναμενόμενης ζήτησης των επιλεγμένων δύο clusters κατά τη διάρκεια μιας μέσης ημέρας στο Βόλο, όπως αυτά διαμορφώθηκαν μετά τον πολλαπλασιασμό των αντίστοιχων δεδομένων χρήσης του “Velib’” με τους παραπάνω συντελεστές  $0,6 \times 2 = 1,2$ . Οι υποψήφιες τοποθεσίες στο παρόν πρόβλημα του Βόλου κατηγοριοποιούνται σε αυτά τα δύο clusters, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής τους.



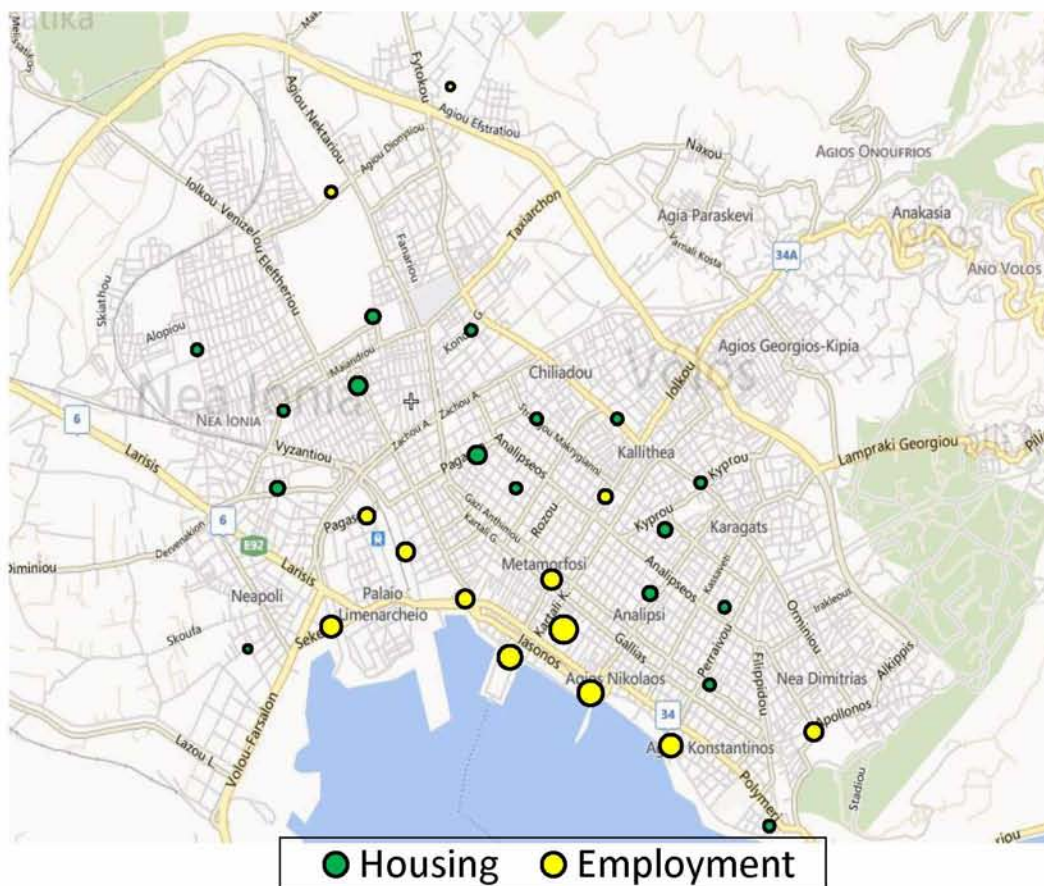


**Σχήμα 4-3: α) Η ωριαία "Ζήτηση για Παραλαβή" κάθε cluster κατά τη διάρκεια μίας ημέρας στο Βόλο**  
**β) Η ωριαία "Ζήτηση για Απόθεση" κάθε cluster κατά τη διάρκεια μίας ημέρας στο Βόλο**

Επιπλέον, στη συγκεκριμένη εφαρμογή του μοντέλου στο Βόλο επιλέχθηκαν 30 υποψήφιες τοποθεσίες, όπου θα μπορούσε να κατασκευαστούν σταθμοί κοινόχρηστων ποδηλάτων, λαμβάνοντας υπόψη σημαντικά αστικά στοιχεία, όπως η πυκνότητα του πληθυσμού και η πυκνότητα εργασιών. Αυτές οι 30 τοποθεσίες ταξινομήθηκαν στα προαναφερθέντα 2 clusters.

Επιπλέον, η συνολική ζήτηση δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε κάθε υποψήφιο σταθμό, αλλά εξαρτάται από την απόστασή του από το κέντρο της πόλης και από την ένταση της δραστηριότητας που υπάρχει στην περιοχή που καλύπτει αντίστοιχα ο καθένας από αυτούς. Έτσι, η ζήτηση του κάθε σταθμού πολλαπλασιάζεται με διαφορετικό συντελεστή κλιμάκωσης, ο οποίος είναι ανάμεσα σε 0.25 (απεικονίζει ένα σταθμό χαμηλής δραστηριότητας) έως 2.5 (απεικονίζει ένα σταθμό υψηλής δραστηριότητας). Η μέση τιμή αυτών των συντελεστών είναι 1.

Σε καθεμία, λοιπόν, από τις 30 υποψήφιες τοποθεσίες δόθηκε ένας συντελεστής ζήτησης από 0,25 έως 2,5, σύμφωνα με τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αυτές οι υποψήφιες θέσεις φαίνονται στην Εικόνα 4-8. Το σχέδιο κάθε κουκκίδας δηλώνει το cluster, όπου ανήκει η συγκεκριμένη τοποθεσία και το μέγεθός της είναι ανάλογο του εξειδικευμένου συντελεστή ζήτησης που της έχει δοθεί.



**Εικόνα 4-8: Οι υποψήφιες τοποθεσίες σταθμών ανάλογα με το cluster στο οποίο ανήκουν και το συντελεστή που τους προσδιορίζει.**

Όσον αφορά τα υπόλοιπα δεδομένα του συστήματος είναι ίδια με αυτά που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα για το ΔΚΠ της Αθήνας. Το μόνο δεδομένο του οποίου η τιμή αλλάζει είναι ο προϋπολογισμός, ο οποίος ανέρχεται στο ποσό των 450.000 €.

Ωστόσο, η τιμή της παραμέτρου  $\overline{\max_{\text{ref}}}$  είναι σημαντική σε αυτή την περίπτωση. Ο περιορισμός (8) υποχρεώνει κάθε υποψήφια τοποθεσία  $i$  να ικανοποιείται από έναν εγκαταστημένο σταθμό  $k$  (περιορισμός (6)). Η παράμετρος  $\overline{\max_{\text{ref}}}$  δηλώνει τη χρονική απόσταση περπατήματος εντός της οποίας ένας σταθμός μπορεί να εξυπηρετήσει μια τοποθεσία χωρίς σταθμό (περιορισμός (9)). Δηλαδή, αποτελεί κατά κάποιο τρόπο ένα μέτρο της εγγύτητας των σταθμών ποδηλάτων που θα εγκατασταθούν. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του  $\overline{\max_{\text{ref}}}$  τόσο πυκνότερα εγκαταστημένοι πρέπει να είναι οι σταθμοί ποδηλάτων. Αυτό οδηγεί το μοντέλο στην αναγκαστική εγκατάσταση πολλών σταθμών προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανωτέρω περιορισμοί. Ωστόσο, η εγκατάσταση πολλών σταθμών καταναλώνει μεγάλο μέρος του διαθέσιμου προϋπολογισμού με αποτέλεσμα να δημιουργούνται λιγότερες θέσεις στάθμευσης και να αγοράζονται λιγότερα ποδήλατα. Δηλαδή, η μικρή τιμή της παραμέτρου  $\overline{\max_{\text{ref}}}$  οδηγεί στην εγκατάσταση πολλών και μικρών σταθμών περιορίζοντας τη λύση σε λίγες θέσεις στάθμευσης και λίγα ποδήλατα. Αντίθετα, όταν επιλέγεται μεγαλύτερη τιμή για το  $\overline{\max_{\text{ref}}}$ , τότε αυτό σημαίνει ότι οι τοποθεσίες χωρίς σταθμό μπορούν να εξυπηρετηθούν και από σταθμού που βρίσκονται και πιο μακριά. Δηλαδή, μπορεί να επιλεγεί μια αραιότερη διάταξη των σταθμών και κατ' επέκταση μείωση του αριθμού τους. Αυτό δίνει με τη σειρά του τη δυνατότητα στο μαθηματικό μοντέλο να δημιουργήσει περισσότερες θέσεις στάθμευσης με περισσότερα ποδήλατα εξυπηρετώντας τη ζήτηση με καλύτερο τρόπο.

Λόγω της πολύ μικρής πυκνότητας πληθυσμού του Βόλου, οι υποψήφιες τοποθεσίες είναι λιγότερες και αραιότερες. Κατ' επέκταση, οι εγκαταστημένοι σταθμοί ποδηλάτων σε μια τέτοια πόλη θα είναι λιγότεροι και αραιότεροι. Για να δοθεί στο μαθηματικό μοντέλο η δυνατότητα αραίωσης των σταθμών που θα επιλέξει, η τιμή του  $\overline{\max_{\text{ref}}}$  επιλέγεται λίγο μεγάλη ( $\overline{\max_{\text{ref}}} = 20$  λεπτά) για τους λόγους, που περιγράφηκαν παραπάνω.

## 4.5 Επίλογος

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι κώδικες (Visual Basic και C++) που αναπτύχθηκαν για την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου. Κατόπιν, περιγράφηκαν τα προβλήματα σχεδιασμού μελλοντικών Δικτύων Κοινόχρηστων Ποδηλάτων στο 1ο Δημοτικό Διαμέρισμα του Δήμου Αθηνών και στο πολεοδομικό συγκρότημα του Βόλου, όπως αυτά τα προβλήματα προσεγγίστηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.



## 5 Αποτελέσματα-Ανακεφαλαίωση

Σ' αυτό το Κεφάλαιο, θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα για τα δύο ΔΚΠ, στην Αθήνα και στο Βόλο αντίστοιχα. Τέλος, θα ολοκληρωθεί η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία με μια ανακεφαλαίωση του μοντέλου που αναπτύχθηκε.

### 5.1 Αποτελέσματα ΔΚΠ Αθήνας

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιασθούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα που αφορούν το ΔΚΠ της Αθήνας, όπως αυτά λύθηκαν για δύο διαφορετικές περιπτώσεις, οι οποίες προσεγγίζουν το σύστημα, διαφοροποιώντας το ποσοστό των πολιτών της πόλης, οι οποίοι είναι διατεθειμένοι να χρησιμοποιήσουν το σύστημα ακόμη κι αν η τοποθεσία τους βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τον πιο κοντινό σταθμό κοινόχρηστων ποδηλάτων.

Στην πρώτη περίπτωση, θεωρείται ότι όλοι οι δυνητικοί πελάτες των τοποθεσιών, που δεν επιλέχθηκαν για εγκατάσταση σταθμού κοινόχρηστων ποδηλάτων, είναι πρόθυμοι να περπατήσουν μέχρι τον πλησιέστερο σταθμό με σκοπό να πάρουν ή να αφήσουν ένα ποδήλατο ( $\overline{perde} = 1$ ). Στη δεύτερη περίπτωση θεωρείται ότι μόνο το 50 % από τους πολίτες θα ήθελαν να το κάνουν αυτό, δηλαδή να περπατήσουν μια απόσταση για να χρησιμοποιήσουν το ΔΚΠ ( $\overline{perde} = 0.5$ ). Συνεπώς το υπόλοιπο των δυνητικών πελατών δεν χρησιμοποιούν το ΔΚΠ κι έτσι η δυνητική ζήτηση χάνεται. Όλες οι άλλες παράμετροι είναι ίδιες και για τις δύο περιπτώσεις.

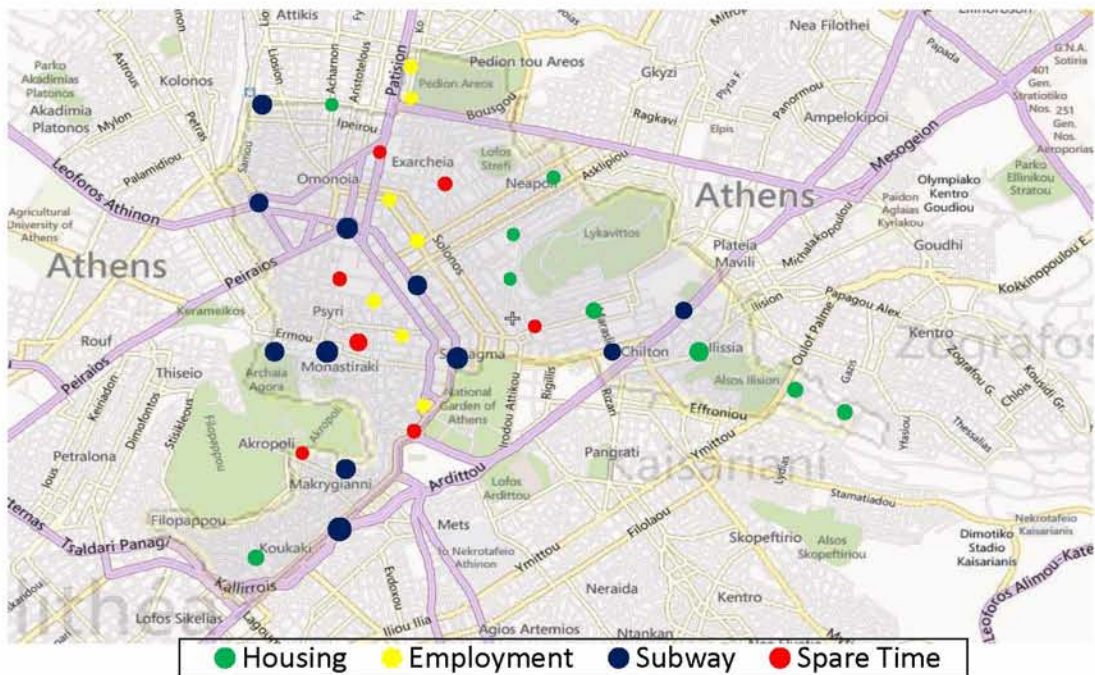
Ο Πίνακας 5-1 απεικονίζει τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από τις δύο περιπτώσεις. Οι 50 υποψήφιες θέσεις ομαδοποιήθηκαν στα τέσσερα clusters, το όνομα των οποίων είναι στην πρώτη στήλη. Το όνομα κάθε υποψήφιου σταθμού, όπως φαίνεται στην τρίτη στήλη, προέρχεται από την περιοχή στην οποία βρίσκεται ο καθένας από αυτούς και δόθηκε με σκοπό να είναι πιο ρεαλιστικό το προτεινόμενο ΔΚΠ. Οι στήλες τέσσερα και έξι δείχνουν τις προτεινόμενες θέσεις στάθμευσης ποδηλάτων για καθεμία από τις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα. Οι σταθμοί στους οποίους εμφανίζονται μηδέν θέσεις στάθμευσης, σημαίνει ότι δεν έχουν κατασκευαστεί και πως ολόκληρη η ζήτηση ή ένα ποσοστό 50% αυτής μεταφέρεται στους εγκατεστημένους σταθμούς. Οι στήλες 5 και 7 δείχνουν τον προτεινόμενο αριθμό ποδηλάτων, δηλαδή τον αριθμό των ποδηλάτων που θα πρέπει να έχει κάθε σταθμός στην αρχή κάθε ημέρας προκειμένου να ικανοποιηθεί η μέγιστη δυνατή ζήτηση της ημέρας.

Πίνακας 5-1 Αποτελέσματα της 1ης και 2ης περίπτωσης για το ΔΚΠ της Αθήνας

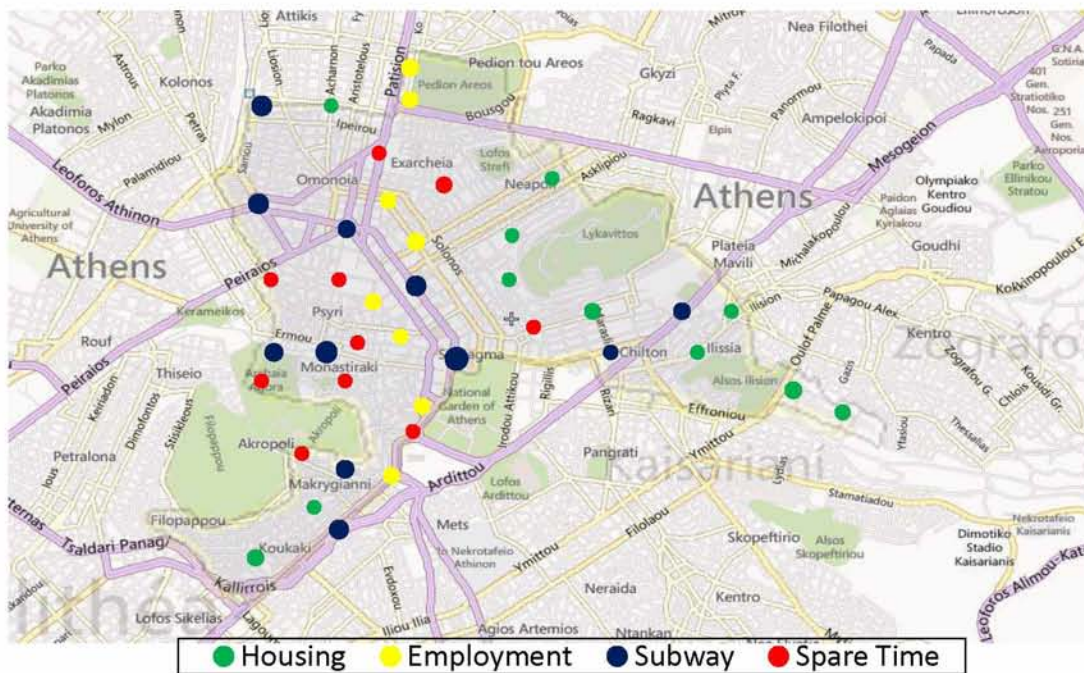
Cluster	Αριθμός Τοποθεσίας	Όνομα τοποθεσίας	Περίπτωση 1 (perde=1)		Περίπτωση 2 (perde=0.5)	
			DNk	BNkt0	DNk	BNkt0
Housing	1	Αγ. Παύλος	0	0	0	0
	2	Αχαρνών-Ιουλιανού	8	5	8	5
	3	Βεΐκου	14	13	12	10
	4	Ιπποκράτους	9	8	8	7
	5	Λόφος Στρέφη	0	0	0	0
	6	Μαράσλειος	14	13	11	10
	7	Μιχαλακοπούλου	21	17	8	8
	8	Πλατεία Βραζιλίας	0	0	8	7
	9	Πλατεία Γαργαρέτας	0	0	8	7
	10	Πλατεία Λυκαβηττού	8	5	8	5
	11	Πλατεία Τάσου Βουρνά	8	5	8	5
	12	Πλατεία Ωδείου	0	0	0	0
	13	Συγγρού-Πετμεζά	0	0	0	0
	14	Τελεφερίκ Λυκαβηττού	0	0	0	0
	15	Φιλοπάππου	0	0	0	0
	16	Φοιτητική Εστία Πανεπιστημίου	13	13	13	13
	17	Φοιτητική Εστία Πανεπιστημίου 2	13	10	10	10
Employment	18	Άγαλμα Κολοκοτρώνη	10	1	9	1
	19	Ακαδημίας	13	2	13	2
	20	ΑΣΟΕΕ	13	2	13	2
	21	Αχαρνών-Μάρνη	0	0	0	0
	22	Πεδίον Άρεως	11	1	11	1
	23	Πλατεία Κάνιγγος	11	3	11	1
	24	Πλατεία Κλαυθμώνος	11	1	11	1
	25	Συγγρού-Αθαν. Διάκου	0	0	11	1
	26	Φιλελλήνων	11	3	11	1
Subway	27	Ακρόπολη	23	8	14	6
	28	Ευαγγελισμός	16	7	9	6
	29	Θησείο	22	8	15	7
	30	Μέγαρο Μουσικής	16	7	13	5
	31	Μεταξουργείο	19	9	19	9
	32	Μοναστηράκι	28	12	22	13
	33	Ομόνοια	26	12	13	8
	34	Πανεπιστήμιο	23	12	19	9
	35	Στ. Λαρίσης	23	14	19	9



	36	Συγγρού Φιξ	35	26	17	11
	37	Σύνταγμα	27	14	26	13
Spare Time	38	Αέρηδες	0	0	0	0
	39	Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο	8	2	8	2
	40	Ηρώδειο	8	2	8	2
	41	Θησείο Καφέ	0	0	8	1
	42	Κυδαθηναίων	0	0	0	0
	43	Παναγιά Καπνικαρέα	17	3	8	2
	44	Πλατεία Αγοράς	0	0	8	1
	45	Πλατεία Ελευθερίας	0	0	8	1
	46	Πλατεία Εξαρχείων	10	5	11	3
	47	Πλατεία Φιλικής Εταιρείας	8	1	8	1
	48	Στήλες Ολυμπίου Διός	10	3	8	1
	49	Στοά Αθανάτων	10	6	8	3
	50	Ψυρρή	0	0	0	0



Εικόνα 5-1: Οι εγκατεστημένοι σταθμοί του ΔΚΠ της Αθήνας για την 1η περίπτωση (perde=1)



**Εικόνα 5-2: Οι εγκατεστημένοι σταθμοί του ΔΚΠ της Αθήνας για την 2η περίπτωση (perde=0.5)**

Η Εικόνα 5-1 και η Εικόνα 5-2 απεικονίζουν το χάρτη του 1ου Δημοτικού Διαμερίσματος της Αθήνας, στον οποίο εμφανίζονται οι προτεινόμενοι σταθμοί ποδηλάτων στην περίπτωση 1 και 2 αντίστοιχα. Επίσης φαίνεται το μέγεθος κάθε σταθμού και το cluster στο οποίο ανήκει, το οποίο χαρακτηρίζεται από το μέγεθος και το σχέδιο κάθε κουκίδας αντίστοιχα.

Στην πρώτη περίπτωση, ο συνολικός αριθμός των σταθμών ενοικίασης είναι 34 και ο αριθμός των θέσεων στάθμευσης είναι 517, με μέσο όρο στους σταθμούς  $517/34 = 15,2$  θέσεις ανά σταθμό. Εξετάζοντας τις θέσεις στάθμευσης του κάθε σταθμού, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι οι μεγαλύτεροι σταθμοί ανήκουν στο cluster "Subway", το οποίο χαρακτηρίζεται από αυξημένη ζήτηση αφού οι σταθμοί ποδηλάτων είναι δίπλα στους σταθμούς του μετρό. Ο συνολικός αριθμός των ποδηλάτων στο δίκτυο είναι 253 και η κατανομή τους κατά το πρώτο χρονικό διάστημα της ημέρας δείχνει ότι οι σταθμοί του cluster "Housing" είναι σχεδόν γεμάτοι ποδήλατα, προκειμένου να εξυπηρετηθεί η αυξημένη «Ζήτηση για Παραλαβή» κατά τη διάρκεια των πρωινών ωρών αιχμής. Από την άλλη πλευρά, οι σταθμοί του cluster "Employment" δεν έχουν πολλά ποδήλατα στην αρχή της ημέρας, προκειμένου να υπάρχουν περισσότερες ελεύθερες θέσεις στάθμευσης και να ανταποκριθεί το σύστημα στην αυξημένη «Ζήτηση για Απόθεση» σε αυτούς τους σταθμούς κατά πρωινές ώρες αιχμής.

Στη δεύτερη περίπτωση, οι εγκατεστημένοι σταθμοί είναι 40 με συνολικό αριθμό θέσεων στάθμευσης 461 με μέσο όρο  $461/40 = 11.5$  θέσεις ανά σταθμό. Τα ποδήλατα που ορίζονται γι' αυτή την περίπτωση είναι 210. Όπως και στην



προηγούμενη περίπτωση έτσι κι εδώ, το δίκτυο εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά αναφορικά με την κατανομή των ποδηλάτων στη διάρκεια της ημέρας.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων, θα πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει μια διαφορά μεταξύ τους στον αριθμό και το μέγεθος των εγκατεστημένων σταθμών. Στη δεύτερη περίπτωση το μοντέλο, όποτε δεν κατασκευάζει σταθμό και εξυπηρετεί τη συγκεκριμένη θέση από ένα κοντινό σταθμό, «χάνει» το 50 % της ζήτησης, το οποίο δεν συμβαίνει στην πρώτη περίπτωση. Για το λόγο αυτό, η δεύτερη λύση προτείνει περισσότερους σταθμούς από την πρώτη με αποτέλεσμα να μένουν λιγότερα χρήματα απ' ό,τι πριν κι έτσι οι σταθμοί είναι μεν περισσότεροι αλλά με λιγότερες θέσεις στάθμευσης.

## 5.2 Αποτελέσματα ΔΚΠ Βόλου

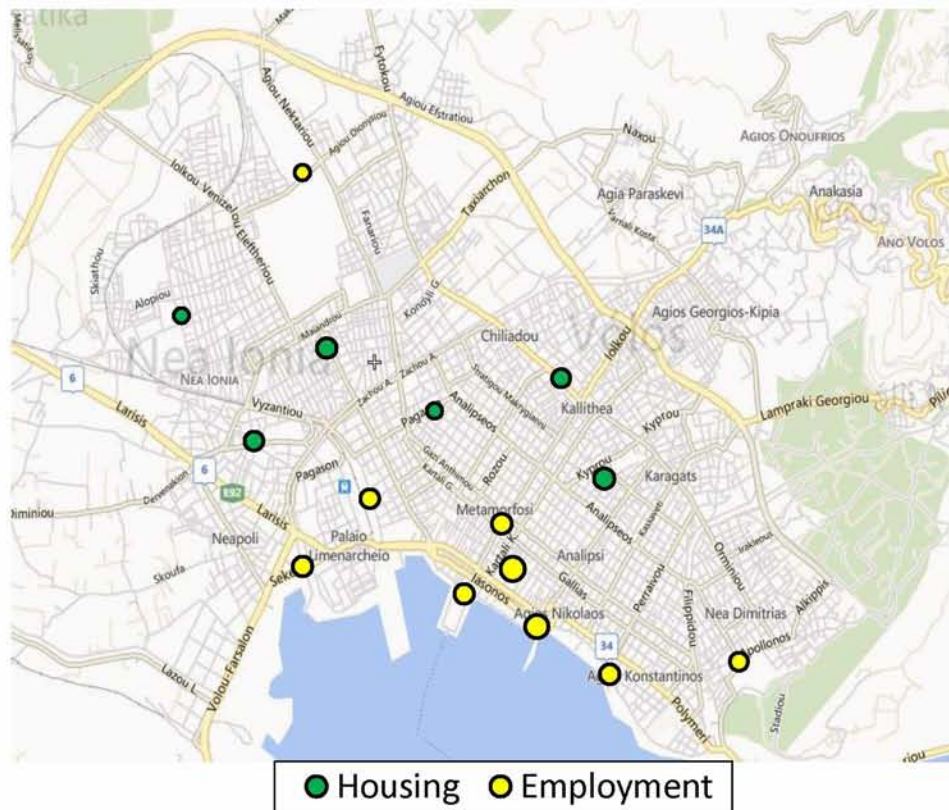
Στην παράγραφο αυτή, θα παρουσιασθούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα που αφορούν το ΔΚΠ του Βόλου, όπως αυτά λύθηκαν για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις οι οποίες αναφέρθηκαν και στην προηγούμενη παράγραφο.

Στην πρώτη περίπτωση, θεωρείται ότι όλοι οι δυνητικοί πελάτες των περιοχών, που δεν έχουν επιλεγεί για εγκατάσταση σταθμού κοινόχρηστων ποδηλάτων, είναι πρόθυμοι να περπατήσουν μέχρι τον πλησιέστερο σταθμό με σκοπό να πάρουν ή να αφήσουν ένα ποδήλατο ( $\overline{perde} = 1$ ). Στη δεύτερη περίπτωση θεωρείται ότι μόνο το 50 % από τους πολίτες θα ήθελαν να το κάνουν αυτό, δηλαδή να περπατήσουν μία απόσταση για να χρησιμοποιήσουν το ΔΚΠ ( $\overline{perde} = 0.5$ ). Συνεπώς το υπόλοιπο των δυνητικών πελατών δεν χρησιμοποιούν το ΔΚΠ κι έτσι η δυνητική ζήτηση χάνεται. Όλες οι άλλες παράμετροι είναι ίδιες και για τις δύο περιπτώσεις.

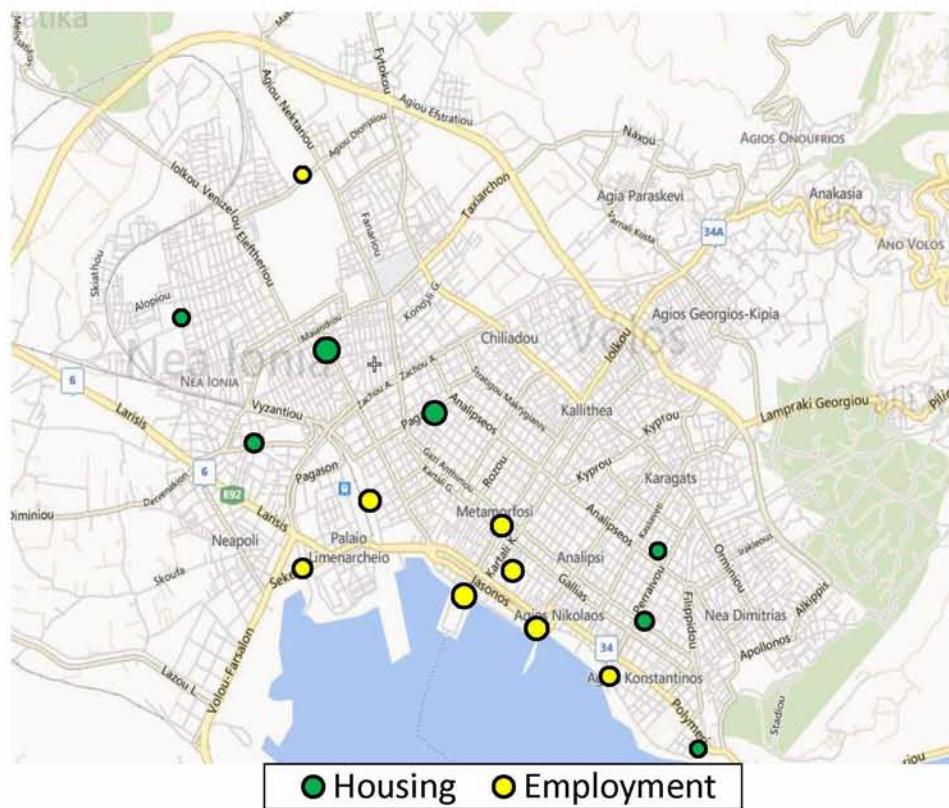
Ο Πίνακας 5-2 απεικονίζει τα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν για τις δύο περιπτώσεις. Οι 30 υποψήφιες θέσεις ομαδοποιήθηκαν στα δύο clusters, το όνομα των οποίων είναι στην πρώτη στήλη. Το όνομα κάθε υποψήφιου σταθμού, όπως φαίνεται στην τρίτη στήλη, προέρχεται από την περιοχή στην οποία βρίσκεται ο καθένας από αυτούς και δόθηκε με σκοπό να είναι πιο ρεαλιστικό το προτεινόμενο ΔΚΠ. Οι στήλες τέσσερα και έξι δείχνουν τις προτεινόμενες θέσεις στάθμευσης ποδηλάτων για καθεμία από τις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα. Οι σταθμοί στους οποίους εμφανίζονται μηδέν θέσεις στάθμευσης, σημαίνει ότι δεν έχουν κατασκευαστεί και πως ολόκληρη η ζήτηση ή ένα το 50% αυτής μεταφέρεται. Οι στήλες 5 και 7 δείχνουν τον προτεινόμενο αριθμό ποδηλάτων, δηλαδή τον αριθμό των ποδηλάτων που θα πρέπει να έχει κάθε σταθμός στην αρχή κάθε ημέρας προκειμένου να ικανοποιηθεί η μέγιστη δυνατή ζήτηση της ημέρας.

Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα της 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> περίπτωσης για το ΔΚΠ Βόλου

Cluster	Αριθμός Τοποθεσίας	Όνομα Τοποθεσίας	Περίπτωση 1 (perde=1)		Περίπτωση 2 (perde=0.5)	
			DNk	BNkt0	DNk	BNkt0
<b>Housing</b>	<b>1</b>	Αγ. Ανάργυροι	12	10	10	9
	<b>2</b>	Άναυρος	0	0	8	4
	<b>3</b>	Αγία Βαρβάρα	0	0	0	0
	<b>4</b>	Βασδέκειο	8	4	8	4
	<b>5</b>	Βλαχάβα- Λόρδου Βύρωνα	0	0	8	3
	<b>6</b>	Γ. Δήμου-Κύπρου	0	0	0	0
	<b>7</b>	Γαζή-Καραϊσκάκη	0	0	10	8
	<b>8</b>	Εθνικής Αντιστάσεως- Ογλ	14	14	0	0
	<b>9</b>	Ελικοδρόμιο	0	0	0	0
	<b>10</b>	Ευαγγελίστρια	13	13	20	12
	<b>11</b>	Μαιάνδρου-Παπαρήγα	0	0	0	0
	<b>12</b>	Μακρυγιάννη Κουντουριώτου	0	0	0	0
	<b>13</b>	Νεάπολη	0	0	0	0
	<b>14</b>	Πάρκο Χιλιαδούς	11	10	0	0
	<b>15</b>	Ρήγα Φεραίου-Μαυροκορδάτου	0	0	0	0
	<b>16</b>	Ρήγα Φεραίου-Μεταμορφώσεως	0	0	0	0
	<b>17</b>	Ρήγα Φεραίου-Παγασών	8	8	17	17
<b>Employment</b>	<b>18</b>	Αγ. Νικόλαος	20	3	14	4
	<b>19</b>	Αγ. Κωνσταντίνος	13	2	11	10
	<b>20</b>	Αθλητικό Κέντρο	0	0	0	0
	<b>21</b>	Γεωπονική Σχολή	0	0	0	0
	<b>22</b>	Δημαρχείο	0	0	0	0
	<b>23</b>	Ε.Α.Κ	11	5	0	0
	<b>24</b>	Κολυμβητήριο Ν. Ιωνίας	8	2	8	3
	<b>25</b>	Παραλία Λιμάνι	13	2	18	3
	<b>26</b>	Παραλία Παπαστράτου	18	8	16	3
	<b>27</b>	Πλατεία Ελευθερίας	13	8	14	9
	<b>28</b>	Πολυτεχνική Σχολή	13	8	11	3
	<b>29</b>	Σταθμός Τραίνου	12	6	14	5
	<b>30</b>	Φερών Παγασών	0	0	0	0



Εικόνα 5-3: Οι εγκατεστημένοι σταθμοί του ΔΚΠ του Βόλου για την 1<sup>η</sup> περίπτωση (perde=1)



Εικόνα 5-4: Οι εγκατεστημένοι σταθμοί του ΔΚΠ του Βόλου για την 2<sup>η</sup> περίπτωση (perde=0.5)

Η Εικόνα 5-3 και η Εικόνα 5-4 απεικονίζουν το χάρτη του Βόλου, στον οποίο εμφανίζονται οι προτεινόμενοι σταθμοί ποδηλάτων στις περιπτώσεις 1 και 2 αντίστοιχα. Επίσης, φαίνεται το μέγεθος κάθε σταθμού και το cluster στο οποίο ανήκει, το οποίο χαρακτηρίζεται από το μέγεθος και το χρώμα κάθε κουκίδας. Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι ορισμένοι σταθμοί προτείνονται και στις δύο περιπτώσεις, ενώ άλλοι προτείνονται μόνο σε μία από τις δύο περιπτώσεις.

Στην πρώτη περίπτωση ο συνολικός αριθμός των σταθμών ενοικίασης είναι 15 και ο αριθμός των θέσεων στάθμευσης είναι 187, με μέσο όρο στους σταθμούς  $187/15 = 12,5$  θέσεις ανά σταθμό. Ο συνολικός αριθμός των ποδηλάτων στο δίκτυο είναι 103 και η κατανομή τους κατά το πρώτο χρονικό διάστημα της ημέρας δείχνει ότι οι σταθμοί του cluster “Housing” είναι σχεδόν γεμάτοι ποδήλατα, προκειμένου να εξυπηρετηθεί η αυξημένη «Ζήτηση για Παραλαβή» κατά τις πρωινές ώρες αιχμής. Από την άλλη πλευρά, οι σταθμοί του cluster “Employment” δεν έχουν πολλά ποδήλατα στην αρχή της ημέρας, ώστε να υπάρχουν περισσότερες ελεύθερες θέσεις στάθμευσης προκειμένου να ανταποκριθεί το σύστημα στην αυξημένη «Ζήτηση για Απόθεση» κατά τις πρωινές ώρες αιχμής.

Στη δεύτερη περίπτωση, οι εγκατεστημένοι σταθμοί είναι, επίσης, 15 με συνολικό αριθμό θέσεων στάθμευσης 187 με μέσο όρο  $187/15 = 12,5$  θέσεις ανά σταθμό. Τα ποδήλατα που ορίζονται γι’ αυτή την περίπτωση είναι 97. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι κι εδώ, το δίκτυο εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά αναφορικά με την κατανομή των ποδηλάτων στη διάρκεια της ημέρας.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι δύο λύσεις ταυτίζονται ως προς το συνολικό αριθμό σταθμών ποδηλάτων και θέσεων στάθμευσης, ενώ και ο συνολικός αριθμός ποδηλάτων είναι μεγαλύτερος στην 1<sup>η</sup> περίπτωση μόλις κατά 6 ποδήλατα. Ωστόσο, οι τοποθεσίες που επιλέγονται σε κάθε λύση για εγκατάσταση σταθμού είναι διαφορετικές, όπως φαίνεται και στους χάρτες των εικόνων 5-3 και 5-4. Όμως, ακόμη και όταν οι δύο λύσεις επιλέγουν τους ίδιους σταθμούς, αυτοί διαφέρουν ως προς τον αριθμό των θέσεων στάθμευσης που έχουν σε καθεμιά από αυτές (Πίνακας 5-2). Επίσης, διαφορετική είναι και η κατανομή των ποδηλάτων στους σταθμούς για τις δύο περιπτώσεις (Πίνακας 5-2).

Στη δεύτερη περίπτωση το μοντέλο, όποτε δεν κατασκευάζει σταθμό και εξυπηρετεί τη συγκεκριμένη θέση από ένα κοντινό σταθμό, «χάνει» το 50 % της ζήτησης, το οποίο δεν συμβαίνει στην πρώτη περίπτωση. Για το λόγο αυτό, η δεύτερη λύση διαφέρει από την πρώτη ως προς την κατανομή των σταθμών, των θέσεων στάθμευσης και των ποδηλάτων.

### 5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων Αθήνας με τη μέθοδο Monte Carlo

Το παράδειγμα του 1<sup>ου</sup> Δημοτικού Διαμερίσματος του Δήμου Αθηναίων επιλύθηκε και με μια άλλη μέθοδο με τη χρήση στοχαστικής ζήτησης των υποψήφιων τοποθεσιών. Η στοχαστική ζήτηση προσομοιώθηκε με τη μέθοδο Monte Carlo και θεωρήθηκε ότι ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή με διαφορετικά άνω και κάτω όρια για κάθε ζήτηση κάθε τοποθεσίας. Στο παράδειγμα εφαρμόστηκε η Επαναληπτική Τριχοτομική Προσέγγιση, όπου εκτελέστηκαν γύροι απόφασης, καθένας από τους οποίους αποτελείται από 1000 προσομοιώσεις Monte Carlo - IP βελτιστοποιήσεις του μαθηματικού μοντέλου. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μέθοδο είναι το μοντέλο του Κεφαλαίου 3 χωρίς το σκετ του χρόνου και το δείκτη  $t$  του χρόνου. Δηλαδή, οι μεταβλητές και οι παράμετροι του μοντέλου δε διαθέτουν το δείκτη  $t$  και λαμβάνουν μία τιμή για κάθε υποψήφια θέση στάθμευσης  $i$ .

Οι 1000 επαναλήψεις, που εκτελέστηκαν, οδηγούν σε 1000 βέλτιστες λύσεις. Καθεμία από αυτές περιλαμβάνει ένα βέλτιστο συνδυασμό εγκατεστημένων σταθμών. Οι τοποθεσίες κατηγοριοποιούνται σε πράσινο, κόκκινο και γκρι υποσύνολο ανάλογα με τις φορές που συμμετέχουν στη βέλτιστη λύση. Δηλαδή, οι τοποθεσίες που επιλέγονται για εγκατάσταση σταθμού σε 990 ή περισσότερες επαναλήψεις εντάσσονται στο πράσινο υποσύνολο, ενώ εκείνες που επιλέχθηκαν σε 10 ή λιγότερες επαναλήψεις εντάσσονται στο κόκκινο υποσύνολο. Οι τοποθεσίες, στις οποίες εγκαθίσταται σταθμός από 11 ως 989 φορές στις 1000 επαναλήψεις εντάσσονται στο γκρι υποσύνολο.

Στον επόμενο γύρο απόφασης εισάγονται περιορισμοί στο μαθηματικό μοντέλο για την υποχρεωτική εγκατάσταση σταθμών ποδηλάτων στις πράσινες τοποθεσίες και όχι στις κόκκινες. Για τις γκρι τοποθεσίες μειώνεται η αβεβαιότητα της ζήτησης, δηλαδή μειώνεται το εύρος της ομοιόμορφης κατανομής των ζητήσεών τους. Με αυτές τις αλλαγές εκτελείται ο επόμενος γύρος απόφασης και συμπληρώνονται πάλι τα υποσύνολα. Η διαδικασία ολοκληρώνεται και επιτυγχάνεται η τελική λύση, όταν το γκρι υποσύνολο θα είναι κενό και όλες οι τοποθεσίες θα έχουν ενταχθεί είτε στο πράσινο είτε στο κόκκινο υποσύνολο.

Τότε, έχοντας αποφασίσει σε ποιες τοποθεσίες θα εγκατασταθούν σταθμοί και σε ποιες όχι, εκτελείται ακόμη ένας γύρος 1000 επαναλήψεων, στον οποίο η ζήτηση όλων των τοποθεσιών έχει την αρχική μέγιστη στοχαστικότητά της, δηλαδή το μεγαλύτερο εύρος ομοιόμορφων κατανομών. Από τα αποτελέσματα αυτού του γύρου συνάγονται συμπεράσματα για τις πιο πιθανές τιμές των θέσεων στάθμευσης κάθε σταθμού. Κατόπιν, ορίζονται άνω και κάτω όρια με βάση αυτές τις πιο πιθανές τιμές και εισάγονται στο μαθηματικό μοντέλο ως περιορισμοί. Τέλος, το μοντέλο επιλύεται μία και μοναδική φορά, στην οποία οι ζητήσεις κάθε τοποθεσίας παίρνουν την ενδιάμεση τιμή των ομοιόμορφων κατανομών τους, και λαμβάνεται η τελική ολοκληρωμένη λύση.

Στην εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου, η ζήτηση προσεγγίστηκε με διαφορετικό τρόπο από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Λήφθηκαν υπόψη επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν τη ζήτηση κοινόχρηστων ποδηλάτων, όπως είναι η ύπαρξη ή όχι ποδηλατοδρόμων, η τοπογραφία του εδάφους κ.ά. Εκτελέστηκε και πάλι μια ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις τιμές της παραμέτρου  $\overline{perde}$  για  $\overline{perde}=1$  και  $\overline{perde}=0.5$  και παρακάτω θα παρουσιασθούν τα συγκριτικά αποτελέσματα σε σχέση με αυτά του μοντέλου της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

### 5.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για $\overline{perde}=1$

Στον Πίνακα 5-3 απεικονίζονται οι δύο συνολικές λύσεις για την περίπτωση  $\overline{perde}=1$  και για τις δύο μεθόδους. Παρατηρείται ότι η στοχαστική μέθοδος με την προσομοίωση Monte Carlo οδηγεί σε περισσότερους και μικρότερους σταθμούς κοινόχρηστων ποδηλάτων από το μοντέλο της ντετερμινιστικής ωριαίας ζήτησης, ενώ ο αριθμός των ποδηλάτων είναι ελαφρά μικρότερος. Εξάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο ευαίσθητη ως προς την παράμετρο  $\overline{perde}$ , αφού ο αριθμός των σταθμών είναι μεγάλος.

**Πίνακας 5-3: Συγκριτικά συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την περίπτωση  $\overline{perde}=1$**

	Ντετερμινιστική Ωριαία Ζήτηση	Προσομοίωση Monte Carlo
Αριθμός σταθμών ποδηλάτων	34	38
Αριθμός θέσεων στάθμευσης	517	470
Αριθμός ποδηλάτων	253	242
Συνολικός Προϋπολογισμός	999800	1000000

Τα αίτια που οδηγούν σε αυτό το συμπέρασμα είναι δυσδιάκριτα, διότι, εκτός από τη διαδικασία βελτιστοποίησης του μαθηματικού μοντέλου, περιλαμβάνεται η προσομοίωση της ζήτησης επιλέγοντας σε κάθε επανάληψη μια τιμή από μια ομοιόμορφη κατανομή, η οποία επηρεάζει τη λύση. Επίσης, η εφαρμογή της Επαναληπτικής Τριχοτομικής Προσέγγισης επηρεάζει την τελική λύση αμβλύνοντας την ευαισθησία της τελικής λύσης ως προς κάθε παράμετρο του μοντέλου.

Ένα ακόμη αίτιο στο οποίο ενδέχεται να οφείλεται η μειωμένη ευαισθησία του μοντέλου με την προσομοίωση Monte Carlo είναι οι ίδιες οι τιμές της ζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό των οριακών τιμών των ομοιόμορφων κατανομών κάθε ζήτησης κάθε τοποθεσίας λήφθηκαν υπόψη παράγοντες, όπως η ύπαρξη ή όχι ποδηλατοδρόμων και η τοπογραφία. Η υπό μελέτη περιοχή του κέντρου της Αθήνας δε διαθέτει ευνοϊκά στοιχεία για τη χρήση



κοινόχρηστων ποδηλάτων ως προς αυτούς τους παράγοντες (απουσία ποδηλατοδρόμων, έντονο ανάγλυφο κτλ.). Το γεγονός αυτό οδήγησε σε ένα κατά μέσο όρο γενικό συντελεστή 0,81 επί των τιμών του “Velib’”, ενώ στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ο μέσος όρος των επιμέρους συντελεστών κάθε τοποθεσίας είναι 1. Δηλαδή, η ζήτηση στην προσομοίωση Monte Carlo θεωρήθηκε μικρότερη στο σύνολό της από αυτή στο ντετερμινιστικό μοντέλο. Η παράμετρος *perde* εκφράζει το ποσοστό της ζήτησης που μετακυλίνεται από μια τοποθεσία χωρίς σταθμό στον κοντινότερο σταθμό. Πολλαπλασιάζεται, δηλαδή, με τη ζήτηση. Όταν η συνολική ζήτηση είναι μειωμένη είναι λογικό η μεταβολή αυτής της παραμέτρου να επηρεάζει λιγότερο την τελική λύση.

Παρατηρώντας το χάρτη της λύσης με την προσομοίωση Monte Carlo (Εικόνα 5-5) και συγκρίνοντάς τον με τον χάρτη της λύσης με τη ντετερμινιστική ωριαία ζήτηση (Εικόνα 5-1), καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι η πρώτη παρουσιάζει μεγαλύτερη πυκνότητα σταθμών ποδηλάτων από τη δεύτερη. Αυτό είναι λογικό να συμβαίνει αφού περιλαμβάνει περισσότερους σταθμούς. Έχουν 32 κοινούς σταθμούς, γεγονός που σημαίνει ότι η λύση με Monte Carlo δεν περιλαμβάνει μόλις 2 από τους σταθμούς της λύσης με τη ντετερμινιστική ωριαία ζήτηση. Το γεγονός αυτό ενισχύει τη βεβαιότητα για την εγκατάσταση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων σε αυτές τις 32 κοινές τοποθεσίες.



Εικόνα 5-5: Χάρτης λύσης με τη προσομοίωση Monte Carlo για *perde*=1



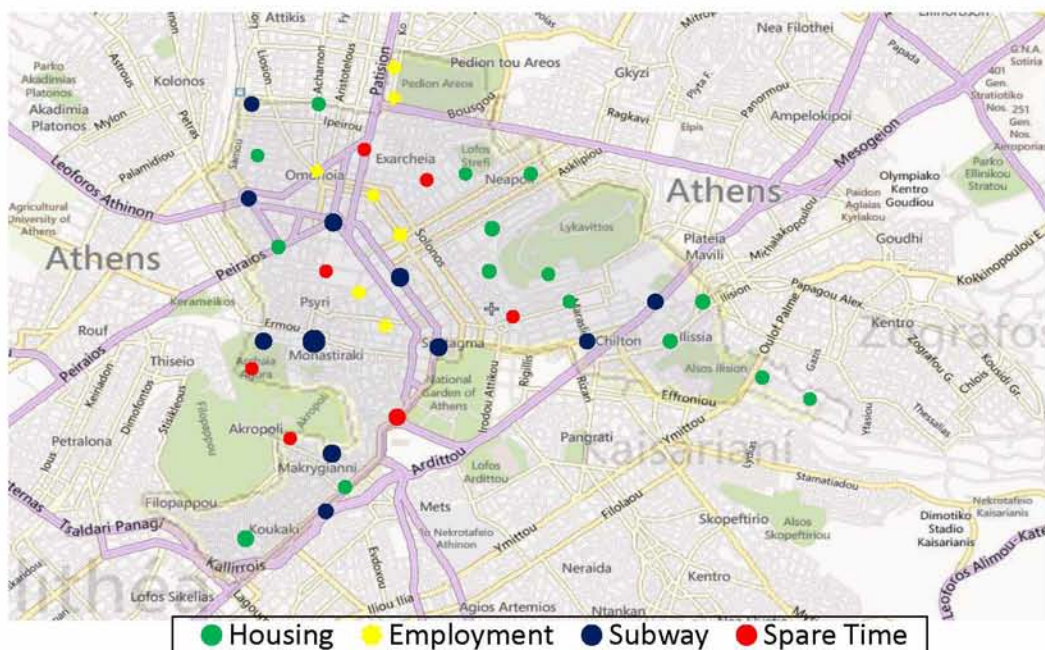
### 5.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για $perde=0.5$

Στον Πίνακα 5-4 απεικονίζονται οι δύο συνολικές λύσεις για την περίπτωση  $perde = 0.5$  και για τις δύο μεθόδους. Παρατηρείται ότι η στοχαστική μέθοδος με την προσομοίωση Monte Carlo οδηγεί στον ίδιο αριθμό σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων με το μοντέλο της ντετερμινιστικής ωριαίας ζήτησης, ενώ ο συνολικός αριθμός θέσεων στάθμευσης και ποδηλάτων στο δίκτυο είναι περίπου ο ίδιος.

**Πίνακας 5-4: Συγκριτικά συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την περίπτωση  $perde=0.5$**

	Ντετερμινιστική Ωριαία Ζήτηση	Προσομοίωση Monte Carlo
Αριθμός σταθμών ποδηλάτων	40	40
Αριθμός θέσεων στάθμευσης	461	448
Αριθμός ποδηλάτων	210	232
Συνολικός Προϋπολογισμός	999900	999200

Παρατηρώντας το χάρτη της λύσης με την προσομοίωση Monte Carlo (Εικόνα 5-6) και συγκρίνοντάς τον με τον χάρτη της λύσης με τη ντετερμινιστική ωριαία ζήτηση (Εικόνα 5-2), καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι οι δύο λύσεις μοιάζουν αρκετά. Έχουν 34 κοινούς σταθμούς, ενώ οι υπόλοιποι 6 είναι διαφορετικοί σε κάθε λύση. Ωστόσο, αυτοί οι διαφορετικοί σταθμοί εντοπίζονται σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους. Θα έλεγε, δηλαδή, κανείς ότι η λύση με τη μέθοδο Monte Carlo επιλέγει 6 διαφορετικούς σταθμούς, καθένας από τους οποίους βρίσκεται κοντά σε έναν από τους 6 διαφορετικούς σταθμούς της λύσης με τη ντετερμινιστική ωριαία ζήτηση.



**Εικόνα 5-6: Χάρτης λύσης με τη προσομοίωση Monte Carlo για  $perde=0.5$**



Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι οι δύο συγκρινόμενες μέθοδοι παρουσιάζουν παρόμοια λύση για την περίπτωση  $\overline{perde} = 0.5$ .

## 5.4 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάστηκε ένα νέο μαθηματικό μοντέλο με σκοπό το βέλτιστο σχεδιασμό ενός Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων σε μια πόλη. Όπως τονίστηκε και στο Κεφάλαιο 1, ο σχεδιασμός ενός τέτοιου δικτύου διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο για τη μετέπειτα επιτυχία του.

Ο διαθέσιμος προϋπολογισμός αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα στην εγκατάσταση ενός τέτοιου δικτύου και για το λόγο αυτό ενσωματώνεται στο μαθηματικό μοντέλο μαζί με τα κόστη εγκατάστασης του δικτύου. Η εγγύτητα μεταξύ των σταθμών είναι ακόμη μια παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη από το μαθηματικό μοντέλο και μπορεί να τροποποιείται κάθε φορά η τιμή της προκειμένου να προκύψουν διαφορετικές λύσεις, οι οποίες, στη συνέχεια, θα αξιολογηθούν αναλόγως.

Βασικό κριτήριο για το σχεδιασμό ενός Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων αποτελεί η εκτιμώμενη ζήτηση που αυτό θα κληθεί να ικανοποιήσει μετά την εγκατάστασή του στην εκάστοτε υπό μελέτη πόλη. Στο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε ντετερμινιστική ζήτηση και δεν λήφθηκαν υπόψη στοχαστικές διαδικασίες για τον προσδιορισμό αυτής της παραμέτρου. Η ζήτηση έχει δύο κύριες συνιστώσες, την περιοχή στην οποία εμφανίζεται και το μέγεθος που έχει. Η περιοχή προσεγγίστηκε από το μαθηματικό μοντέλο με την ύπαρξη προκαθορισμένων υπονήφγιων τοποθεσιών, καθεμιά από τις οποίες εμφανίζει μια εκτιμώμενη ζήτηση.

Το μέγεθος της ζήτησης είναι και αυτό που θα καθορίσει σε ποιες περιοχές θα εγκατασταθούν σταθμοί και σε ποιες όχι, καθώς και πόσο μεγάλος θα είναι ο κάθε σταθμός. Στο εν λόγω μαθηματικό μοντέλο η ζήτηση διαχωρίστηκε σε «Ζήτηση για Παραλαβή» και «Ζήτηση για Απόθεση» ποδηλάτων από και προς τις υπονήφιες τοποθεσίες αντίστοιχα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η ωριαία εκτιμώμενη ζήτηση στη διάρκεια μιας μέσης ημέρας. Η λογική που εφαρμόστηκε είναι ότι γνωρίζοντας το προφίλ της ωριαίας ζήτησης που θα εμφανιστεί σε κάθε υπονήφγια τοποθεσία, μπορεί να καθοριστεί ποιες τοποθεσίες θα επιλεγούν για εγκατάσταση σταθμού και εξυπηρέτηση της ζήτησής τους. Επιπρόσθετα, το προφίλ της ωριαίας ζήτησης θα καθορίσει τον αριθμό των ποδηλάτων που θα έχει ο σταθμός στην αρχή της ημέρας προκειμένου να την εξυπηρετήσει με τον καλύτερο τρόπο. Ακόμη, η παραλαβή και απόθεση ποδηλάτων στη διάρκεια της ημέρας, σύμφωνα με την ωριαία ζήτηση, θα καθορίσει και τον αριθμό των θέσεων στάθμευσης κάθε σταθμού, προκειμένου να υπάρχουν οι απαραίτητες ελεύθερες θέσεις για την ικανοποίησή της.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που ενσωματώθηκε στο μαθηματικό μοντέλο είναι η δυνατότητα μετακύλησης της ζήτησης από τις τοποθεσίες που δεν επιλέχθηκαν για εγκατάσταση σταθμού στον κοντινότερό τους σταθμό ποδηλάτων. Δηλαδή, οι δυνητικοί πελάτες μερικών τοποθεσιών που τελικά δεν έχουν σταθμό μπορεί να περπατήσουν μέχρι τον πλησιέστερο και να χρησιμοποιήσουν κοινόχρηστα ποδήλατα. Αυτή είναι μια πρόσθετη ζήτηση στη ήδη υπάρχουσα ζήτηση του ίδιου του σταθμού. Η ύπαρξη της παραμέτρου  $\overline{perde}$  στο μοντέλο δίνει τη δυνατότητα να ληφθεί υπόψη η παραπάνω πρόσθετη ζήτηση σε ποσοστό που ορίζει κάθε φορά εκείνος που επιλύει το πρόβλημα. Το ποσοστό αυτό μπορεί να κυμανθεί από 0% (κανένας πελάτες δεν περπατά στον κοντινό σταθμό) μέχρι και 100% (όλοι οι πελάτες περπατούν στον κοντινό σταθμό).

Επιπλέον, με κατάλληλους περιορισμούς του Ακέραιου Προγραμματισμού επιτεύχθηκε η ημερήσια προσομοίωση του Δικτύου Κοινόχρηστων Ποδηλάτων. Συγκεκριμένα, ο αριθμός των ποδηλάτων που παραλαμβάνονται κάθε ώρα ισούται με την ωριαία «Ζήτηση για Παραλαβή» και το ίδιο ισχύει για τα ποδήλατα που αποτίθενται και την ωριαία «Ζήτηση για Απόθεση». Δηλαδή, οι μεταβλητές  $BF_{kt}$  και  $BE_{kt}$  ακολουθούν τα προφίλ των ζητήσεων, όταν αυτό είναι εφικτό. Όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από τα διαθέσιμα ποδήλατα ή τις ελεύθερες θέσεις στάθμευσης, τότε οι μεταβλητές αυτές ισούνται με αυτές τις αντίστοιχες τιμές.

Σχετικά με την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου, αυτή έγινε για δύο πόλεις-παραδείγματα, την Αθήνα και το Βόλο. Συγκεκριμένα, για το 1<sup>ο</sup> Δημοτικό Διαμέρισμα του Δήμου Αθηναίων επιλέχθηκαν 50 υποψήφιες τοποθεσίες σταθμών ποδηλάτων. Η ζήτησή τους εκτιμήθηκε με βάση τα δεδομένα χρήσης του ήδη εγκαταστημένου ΔΚΠ “Velib” του Παρισιού. Στο μοντέλο εισήχθηκαν συγκεκριμένα δεδομένα και επιχειρήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας ως προς την παράμετρο  $\overline{perde}$ . Επίσης, για το πολεοδομικό συγκρότημα του Βόλου επιλέχθηκαν 30 υποψήφιες τοποθεσίες σταθμών και εκτιμήθηκε η ζήτησή τους με αντίστοιχο τρόπο, όπως και στην Αθήνα. Η ίδια ανάλυση ευαισθησίας επιχειρήθηκε για το παράδειγμα του Βόλου.

Στα αποτελέσματα των δύο παραδειγμάτων παρατηρήθηκε μια διαφορετική συμπεριφορά του μοντέλου ως προς την ανάλυση ευαισθησίας. Δηλαδή, τα συμπεράσματα ήταν διαφορετικά για την περίπτωση του Βόλου, λόγω διαφορετικής ζήτησης και, κυρίως, λόγω επιλογής λιγότερων και αραιότερων υποψήφιων τοποθεσιών για την εγκατάσταση σταθμών κοινόχρηστων ποδηλάτων.

## 6 Βιβλιογραφία

- (1) DeMaio, P. Bike-sharing: History, Impacts, Models of Provision, and Future. *Journal of Public Transportation*, Vol. 12, No 4, 2009, pp. 41-56
- (2) <http://bike-sharing.blogspot.gr/>, Τελευταία επίσκεψη 02/06/2014
- (3) Shaheen S., Guzman S. Zhang H., Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia: Past, Present, and Future, Transportation Research Board Annual Meeting, 2010
- (4) [http://en.wikipedia.org/wiki/Barclays\\_Cycle\\_Hire](http://en.wikipedia.org/wiki/Barclays_Cycle_Hire), Τελευταία επίσκεψη 04/06/2014
- (5) [http://en.wikipedia.org/wiki/Citi\\_Bike](http://en.wikipedia.org/wiki/Citi_Bike), Τελευταία επίσκεψη 04/06/2014
- (6) Shu, J., M. Chou, Q. Liu, C-P Teo and I-L Wang. Bicycle-Sharing System: Deployment, Utilization and the Value of Re-distribution. National University of Singapore, 2010
- (7) Lin, J-R., T-H. Yang. Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. *Transportation Research Part E*, Vol. 47, 2011, pp. 284-294
- (8) Sayarsad, H., S. Tavassoli, F. Zhao. A multi periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization. *Applied Mathematical Modelling*. Vol.36, 2011, pp. 4944-4951
- (9) Martinez, M. L., L. Caetano, T. Eiro, F. Cruz. An optimization algorithm to establish the location of stations of a mixed fleet biking system: an application to the city of Lisbon. *Procedia- Social and Behavioral Sciences*. Vol. 54, 2012, pp. 513-524
- (10) Garcia-Palomares, C. J., J. Gutierrez, M. Latorre. Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach. *Applied Geography*. Vol. 35, 2012, pp. 235-246
- (11) Farahani, Z. R., M. Hekmatfar, B. A. Arabani, and E. Nikbakhsh. Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 64, 2013, pp. 1096-1109
- (12) Κουνιάς Στρατής, Φακίνος Δημήτρης, Γραμμικός Προγραμματισμός Θεωρία και Ασκήσεις, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 1987

- (13) [http://anamorfosi.teicm.gr/ekp\\_yliko/e-notes/Data/linear/main.htm](http://anamorfosi.teicm.gr/ekp_yliko/e-notes/Data/linear/main.htm), Τελευταία επίσκεψη 05/06/2014
- (14) <http://www.math.aegean.gr/eedip/ctsag/homepage/Operational%20Research/NOTES51.pdf>, Τελευταία επίσκεψη 05/06/2014
- (15) Froehlich J., J. Neumann, N. Oliver. Sensing and Predicting the Pulse of the City through Shared Bicycling. Proceedings of the 21st International Joint Conference on Artificial intelligence. USA, 2009, pp. 1420-1426
- (16) Lathia N., S. Ahmed, L. Capra. Measuring the impact of opening the London shared bicycle scheme to casual users. Transportation Research Part C. Vol. 22, 2011, pp. 88-102
- (17) Etienne C., L. Oukhellou. Model-based count series clustering for Bike-sharing system usage mining, a case study with the Velib' system of Paris. Transportation Research-Part C Emerging Technologies. Vol. 22, 2012, pp. 88
- (18) Institut National de la Statistique et des Études Économiques. Présentation de la région Ile-de-France. <http://www.insee.fr/fr/regions/idf/default.asp?page=faitsetchiffres/presentation/presentation.htm>. Accessed Jul. 1, 2013
- (19) Hellenic Statistical Authority (EL.STAT). Population. [http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/PAGEthemes?p\\_param=A1602](http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/PAGEthemes?p_param=A1602). Accessed Jul. 1, 201
- (20) Krykewycz G. R., Puchalsky C. M., Rocks J., Bonnette B., & Jaskiewicz F. (2010). Defining a Primary Market and Estimating Demand for Major Bicycle-Sharing Program in Philadelphia, Pennsylvania. *Transportation Research Record*, 117-12